

Heft 60-1

Neubiberg, 2000

25 Jahre Institut für Geodäsie

Teil 1

Wissenschaftliche Beiträge und Berichte

Herausgegeben von

W. Caspary

H. Heister

A. Schödlbauer

W. Welsch

SCHRIFTENREIHE

STUDIENGANG GEODÄSIE UND GEOINFORMATION
UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN



20080707 026

AQ F08-10-09560

Der Druck dieses Heftes wurde aus Haushaltsmitteln der Universität der Bundeswehr München gefördert.

Auflagenhöhe: 500

Herausgeber der Schriftenreihe:

Studiengang Geodäsie und Geoinformation der Universität der Bundeswehr München

Bezugsnachweis:

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
Studiengang Geodäsie und Geoinformation
Werner-Heisenberg-Weg 39
D - 85577 Neubiberg

ISSN 0173 - 1009

REPORT DOCUMENTATION PAGE

Form Approved OMB No. 0704-0188

Public reporting burden for this collection of information is estimated to average 1 hour per response, including the time for reviewing instructions, searching existing data sources, gathering and maintaining the data needed, and completing and reviewing the collection of information. Send comments regarding this burden estimate or any other aspect of this collection of information, including suggestions for reducing this burden to Washington Headquarters Services, Directorate for Information Operations and Reports, 1215 Jefferson Davis Highway, Suite 1204, Arlington, VA 22202-4302, and to the Office of Management and Budget, Paperwork Reduction Project (0704-0188), Washington, DC 20503.

1. AGENCY USE ONLY (Leave blank)		2. REPORT DATE 2000	3. REPORT TYPE AND DATES COVERED Report	
4. TITLE AND SUBTITLE 25 Jahre Institut für Geodäsie -- Teil 1 Wissenschaftliche Beiträge und Berichte (25 years Institute of Geodesy -- Part 1 Scientific contributions and reports)			5. FUNDING NUMBERS	
6. AUTHOR(S)				
7. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) UNIBW			8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER	
9. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) Universität für der Bundeswehr München Werner-Heisenberg-Weg 39 D-85577 Neubiberg GERMANY			10. SPONSORING/MONITORING AGENCY REPORT NUMBER Heft 60-1, Neubiberg, 2000	
11. SUPPLEMENTARY NOTES Text in German, 331 pages.				
12a. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT Public release. Copyrighted. (1 and 20)			12b. DISTRIBUTION CODE	
ABSTRACT (Maximum 200 words) Modern sensors and data processing capabilities enable the observation of time dependent deformations of objects by continuous measurements. The resulting time series are analyzed using statistical methods in order to model the deformation as a function of time, to detect cause-effect mechanisms and to predict the future behavior of the object. The statistical analysis in the time domain leads to a separation of deterministic and stochastic deformations. A polynomial superimposed with cyclic effects is frequently used to model the deterministic trend. Linear filters can be employed to suppress the stochastic component or to eliminate the trend. The transformation of the time series into the frequency domain facilitates the detection of cyclic effects. The stochastic structure of the time series is modelled by estimated auto-covariances and ARMA-models. An example for deformation measurements is used to demonstrate the steps of the analysis and to underline the fact, that because of spurious observations robust methods of parameter estimation are required. Part 1 contains a collection of scientific articles and reports to those who have contributed to the institute in the past 25 years have belonged or still belong. Machine assisted translation.				
14. SUBJECT TERMS UNIBW, German, Sensors, Data processing, Deformation measurements, Statistical methods, Statistical analysis, Science community			15. NUMBER OF PAGES	
			16. PRICE CODE	
17. SECURITY CLASSIFICATION OF REPORT UNCLASSIFIED	18. SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE UNCLASSIFIED	19. SECURITY CLASSIFICATION OF ABSTRACT UNCLASSIFIED	20. LIMITATION OF ABSTRACT UL	

NSN 7540-01-280-5500

Standard Form 298 (Rev. 2-89)
Prescribed by ANSI Std. Z39-18
298-102

Vorwort

Das Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München besteht seit über 25 Jahren. Es entwickelte sich aus der Zusammenarbeit der vier Professoren, die in den Jahren von 1973 bis 1976 berufen wurden für

Allgemeine Geodäsie: Albert Schödlbauer (1973)

Astronomische und Physikalische Geodäsie: Erik Grafarend (1975)

Ingenieurgeodäsie: Wilhelm Caspary (1975)

Vermessungskunde: Walter Welsch (1976).

Zur Unterstützung der Forschung und Lehre wurde das Geodätische Labor eingerichtet und zu seinem Leiter

Hans Heister (1974)

bestellt.

Nach der Berufung Prof. Grafarends an die Universität Stuttgart richtete sein Nachfolger ab 1981 mit dem Institut für Erdmessung und Navigation eine neue, aus dem Institut für Geodäsie herausgelöste Organisationseinheit ein.

Die drei verbliebenen Professoren können auf eine lange und erfolgreiche kollegiale Zusammenarbeit zurückblicken. Da sie nunmehr innerhalb eines Zeitraumes von 2½ Jahren aus dem aktiven Dienst ausscheiden, haben sie die Veröffentlichung der vorliegenden Denkschrift beschlossen, um die in den zurückliegenden 25 Jahren geleisteten Arbeiten zu dokumentieren. Die Schrift ist so konzipiert, dass neben der Wissenschaft auch Aspekte des Institutslebens zur Sprache kommen. Auf eine Darstellung der Beiträge der Institutsmitglieder zur Gestaltung und Durchführung der Lehre und auf eine Dokumentation der vielfältigen Aufgaben, die in der akademischen Selbstverwaltung und in nationalen und internationalen Gremien übernommen wurden, wird hier verzichtet, da sie als selbstverständliche Aufgaben eines Universitätsinstituts angesehen werden. Näheres kann auch den seit 1977 regelmäßig erschienenen und von der Deutschen Geodätischen Kommission veröffentlichten Jahresberichten entnommen werden.

Die vorliegende Schrift besteht aus drei thematisch unterschiedlichen Teilen:

- Teil 1 enthält eine Sammlung wissenschaftlicher Beiträge und Berichte, zu der diejenigen beigetragen haben, die dem Institut in den vergangenen 25 Jahren angehört haben oder noch angehören,
- Teil 2 berichtet in gebotener Kürze über die wesentlichen Forschungsaktivitäten des Instituts und enthält eine vollständige Übersicht aller Veröffentlichungen,
- Teil 3 ist ein Beitrag, der nicht unmittelbar der Wissenschaft gewidmet ist, sondern eher in einzelnen Schlaglichtern die Umstände aufzeigt, die die wissenschaftliche Arbeit und das Gemeinschaftsleben der Institutsangehörigen begleiteten.

Das Institut, das das jüngste aller geodätischen Institute Deutschlands ist, blickt mit einigem Stolz auf das zurück, was seine Angehörigen in den vergangenen 25 Jahren geleistet haben.

Vorwort zum ersten Teil

In den mehr als 25 Jahren, die das Institut für Geodäsie besteht, hat die Geodäsie im Zuge tiefgreifender technologischer Fortschritte gravierende inhaltliche Veränderungen erfahren. Auch das Berufsbild des Geodäten hat sich grundlegend geändert. Die möglichen Tätigkeitsfelder sind nicht mehr so klar definiert, wie dies vielleicht noch vor einer Generation der Fall war. So fanden die ehemaligen Mitarbeiter nach Abschluss ihrer Tätigkeit am hiesigen Institut nicht nur an anderen wissenschaftlichen Einrichtungen und Hochschulen, an Dienststellen des amtlichen Vermessungswesens und in Ingenieurbüros neue Anstellungen, sondern auch in Berufen, in denen die Geodäsie keine oder nur eine geringe Rolle spielt.

An dem technologischen und beruflichen Wandel haben die Professoren und wissenschaftlichen Mitarbeiter des Instituts für Geodäsie nach Kräften mitgewirkt. Die wissenschaftlichen Beiträge und Berichte, die Angehörige und ehemalige Mitarbeiter des Instituts in den vorliegenden Teil der Denkschrift eingebracht haben, spiegeln den Wandel wider, den geodätische Wissenschaft und Praxis im Berichtszeitraum erlebt haben, und geben darüber hinaus Einblicke in einige neue, abseits der Geodäsie liegende Berufsfelder.

Neubiberg, im Jahre 2000

Die Herausgeber

Inhaltsverzeichnis

CASPARY, W.	Zur Analyse geodätischer Zeitreihen	1
SCHÖDLBAUER, A.	Geodätische Astronomie – Aussichten an der Schwelle zum 21. Jahrhundert	27
WELSCH, W.	Geodätische Analyse dynamischer Prozesse	57
HEISTER, H.	Zur Überprüfung geodätischer Instrumente	69
KRACK, K..	<i>Mathematica</i> -Programme zur Darstellung des Zusammenhanges von geographischer Breite und Meridianbogenlänge auf Rotationsellipsoiden	91
BIELAWSKIE, L.	Aufbau eines Messbusses zur Datenerfassung für kinematische Vermessung	111
CHEN, G.P., STERNBERG, H.	Einsatz des Kalman-Filters zur kinematischen Positionierung eines Landfahrzeuges aus GPS-Daten	117
GEIGER, A	Die Lehrveranstaltung Vermessungskunde für Bauingenieure an der Fachhochschule Regensburg	129
GLASMACHER, H.	Einfache und schnelle Prüfung von GPS-Antennen	135
GRÄFE, G., KLEMM, J., STERNBERG, H.	Das kinematische Vermessungssystem KISS – Zentrierung der Sensordaten und Transformation in das Fahrzeugsystem	143
GROS, F.J.	Rechnergestützte Kartographie – Konzeption, Technik und erste Erfahrungen	155
KELM, R.	Datumsoptimale Datenverarbeitung in der Netzausgleichung	167
KERSTING, N.	Einführung und Einsatz von Geographischen Informationssystemen in Kleinkommunen	181
KLEMM, J.	Photogrammetrische Auswertung von Bildsequenzen	193
KÖNIG, R.	Nichtlineare Analyse einer realen Zeitreihe im Vergleich zu bekannten chaotischen und zufälligen Systemen	205
LANG, M.	Die Grünwalder Brücke – ein historisches Bauwerk im Lichte geodätischer Überwachungsmessungen	215
LECHNER, W., BAUMANN, S.	Verkehrstelematik – Was ist das, wer braucht das, wer bietet das an?	231
MÖSBAUER, M.	Datenbasis für die Entwicklung eines multimedialen Softwareproduktes zur Planung von Freizeitaktivitäten in den Alpen	251
NEUDECK, S.	Transaktionsmechanismen bei der Verwaltung von Geodaten in einer Multiuser Umgebung	259
RICHTER, B.	Elliptische Punktbewegungen	267
SCHERER, B., KRACK, K.	Lokale Geoidbestimmung im Inntal-Netz	281
SCHWINTZER, P.	Globale Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnstörungen: Status, Anwendung und Entwicklungsmöglichkeiten mit der CHAMP Satellitenmission	305
WANG, J., STERNBERG, H.	Modellentwicklung für die kinematische Vermessung von Landverkehrswegen	317

ZUR ANALYSE GEODÄTISCHER ZEITREIHEN

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Caspary

Universität der Bundeswehr München

Institut für Geodäsie

D-85577 Neubiberg

Zusammenfassung

Moderne Entwicklungen in der Sensorik und der Datenverarbeitung ermöglichen es dem Geodäten heute, zeitvariable Objektverformungen durch kontinuierliche Beobachtungen zu erfassen. Die dabei entstehenden Zeitreihen werden mit statistischen Methoden analysiert, um das Verformungsverhalten zu modellieren, Ursache-Wirkung Zusammenhänge aufzudecken und zukünftige Objektdeformationen zu prognostizieren.

Die statistischen Verfahren im Zeitbereich ermöglichen eine Trennung von deterministischen und stochastischen Objektverformungen. Als deterministisches Modell wird häufig ein Polynom gewählt, dem sich zyklische Effekte überlagern. Durch lineare Filter kann der stochastische Anteil unterdrückt oder der Trend eliminiert werden.

Die Transformation der Zeitreihe in den Frequenzbereich erleichtert die Aufdeckung zyklischer Erscheinungen. Die stochastische Struktur der Zeitreihe wird durch die Schätzung von Autokovarianzen erfaßt und durch ARMA-Modelle approximiert.

An einem Beispiel für Deformationsmessungen wird die Vorgehensweise der Zeitreihenanalyse gezeigt und demonstriert, daß wegen der zahlreichen Ausreisser die Schätzung der Modellparameter stets mit robusten Methoden erfolgen sollte.

Abstract

Modern sensors and data processing capabilities enable the observation of time dependent deformations of objects by continuous measurements. The resulting time series are analyzed using statistical methods in order to model the deformation as a function of time, to detect cause-effect mechanisms and to predict the future behavior of the object.

The statistical analysis in the time domain leads to a separation of deterministic and stochastic deformations. A polynomial superimposed with cyclic effects is frequently used to model the deterministic trend. Linear filters can be employed to suppress the stochastic component or to eliminate the trend.

The transformation of the time series into the frequency domain facilitates the detection of cyclic effects. The stochastic structure of the time series is modelled by estimated auto-covariances and ARMA-models.

An example for deformation measurements is used to demonstrate the steps of the analysis and to underline the fact, that because of spurious observations robust methods of parameter estimation are required.

1 Einleitung

Die geodätische Meßtechnik befindet sich seit etwa 20 Jahren in einem tiefgreifenden Wandlungsprozeß, dessen Ende noch nicht abzusehen ist. Treibende Kräfte sind dabei der allgemeine technologische Fortschritt und insbesondere die rasanten Weiterentwicklungen in der Sensor- und Informationstechnologie.

Die in mehreren Generationen entwickelten und bis ins letzte durchdachten meß- und auswertetechnischen Methoden für Winkel-, Strecken- und Höhenmessungen spielen heute nur noch eine untergeordnete Rolle. Die klassischen geodätischen Beobachtungen zur Positionsbestimmung, die man als Momentaufnahmen bezeichnen könnte, werden zunehmend durch kontinuierliche Messungen ersetzt, die es erlauben, neben geometrischen Größen auch Veränderungsprozesse sehr genau und über längere Zeiträume zu erfassen. Ebenso werden zeitabhängige systematische Einflüsse auf die Meßprozesse beobachtbar und können damit weitgehend modelliert und eliminiert werden. Die Kenntnisse, die zur sachgerechten Durchführung und Auswertung solcher kontinuierlichen Beobachtungen benötigt werden, sind vor allem in den Bereichen Signalverarbeitung, industrielle Meßtechnik, Ökonometrie und Systemtheorie entwickelt worden. Sie können aber leicht an die neuen geodätischen Beobachtungsmethoden angepaßt und zur Grundlage neuer mathematischer Modelle gemacht werden, die es ermöglichen, die Position sowie deterministische und stochastische Veränderungen von Objekten zu ermitteln.

Als Ergebnis kontinuierlicher Beobachtungen erhält man Zeitreihen, in denen die Meßwerte zu festen, meist gleichabständigen Zeitpunkten protokolliert sind. Die Analyse dieser Zeitreihen kann mehreren Zielen dienen. Oft geht es darum, ein Modell für das Verhalten des beobachteten Phänomens zu entwickeln, um mit dessen Hilfe die physikalischen Ursachen für die Veränderungen zu erkennen und die Ursache-Wirkung Gesetzmäßigkeiten zu verstehen. Wichtig kann es auch sein, mit Hilfe eines mathematisch-statistischen Modells irreversible, reversible und stochastische Veränderungen eines Objekts zu trennen, oder Parameter von dynamischen Modellen zu schätzen und Annahmen über Materialeigenschaften zu testen. Fast immer ist es auch interessant, mit Hilfe der Zeitreihenanalyse zukünftiges Verhalten des Objekts zu prädictieren oder die Auswirkung von Eingriffen zu überprüfen.

Typische geodätische Beispiele für den Einsatz von Signalverarbeitung und Zeitreihenanalyse findet man in den letzten Jahren auf den Gebieten Deformationsanalysen (CASPARY/SUTOR 1996, CHEN/CHRZANOWSKI 1996, DOLL e.a. 1995, LÖFFLER 1992, ZENKOV 1991), Geodynamik (CAMPBELL e.a. 1992, HÖPFNER 1995, MONTAG 1998, OLAFSSON/SIGBJÖRNSSON 1995, SCHMIDT/SCHUH 1999, WENZEL 1996), GPS-Messungen (HEISTER e.a. 1997, RABAH 1999, RÜHRNÖSSL e.a. 1998, WANNINGER 1993, ZISCHINSKY e.a. 1997) und Geräteuntersuchungen (FASCHING 1993, STAIGER 1998, ZIMMERMANN 1991). Weitere Beispiele aus dem Bereich der Ingenieurgeodäsie findet man in neueren Dissertationen (CHEN 1996, LEVENSHAGEN 1998, KUHLMANN 1996, SUTOR 1997), während in dem Buch (KOCH/SCHMIDT 1994) eine übersichtliche Darstellung der Grundlagen gegeben wird.

Schließlich ist darauf hinzuweisen, daß es Beobachtungsreihen gibt, bei denen geometrische Abstände oder Wegstrecken bzw. einfache Numerierungen anstelle der Zeit als Ordnungsvariable auftreten. Die für die Zeitreihenanalyse entwickelten Methoden können auch auf diese Reihen angewandt werden.

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen zwei typische Beispiele für Zeitreihen. Abbildung 1 ist ein Ausschnitt der Reihe Sonnenflecken, die vom Royal Observatory of Belgium beobachtet und im Internet unter der URL: <http://www.oma.be/KSB-ORB/SIDC/index.html> veröffentlicht wird. Neben den Originaldaten werden zusätzlich geglättete und zusammengefaßte Beobachtungen visualisiert.

Abbildung 2 ist ein Ausschnitt aus einer Beobachtungsreihe, die zur Erfassung von Deformationen an einer Staumauer durchgeführt wurde. Anhand dieser Zeitreihe, die in (CHEN 1996) sehr ausführlich analysiert wurde, soll die typische Vorgehensweise bei der Analyse erläutert werden. Zur Vorbereitung darauf und um die einzelnen Auswerteschritte nachvollziehbar zu machen, werden aber zunächst die theoretischen Grundlagen der benutzten Methoden behandelt, dies jedoch nur in dem Umfang, wie es für das ausgewählte Beispiel erforderlich ist. Umfassende Darstellungen der Zeitreihenanalyse und der digitalen Signalverarbeitung mit zahlreichen allerdings nichtgeodätischen Beispielen findet man

u.a. in den Lehrbüchern (BOX/JENKINS 1976), (BROCKWELL/DAVIS 1996), (CHATFIELD 1989), (HAMMING 1987), (KRONMÜLLER 1991) und (SCHLITTGEN/STREITBERG 1989).

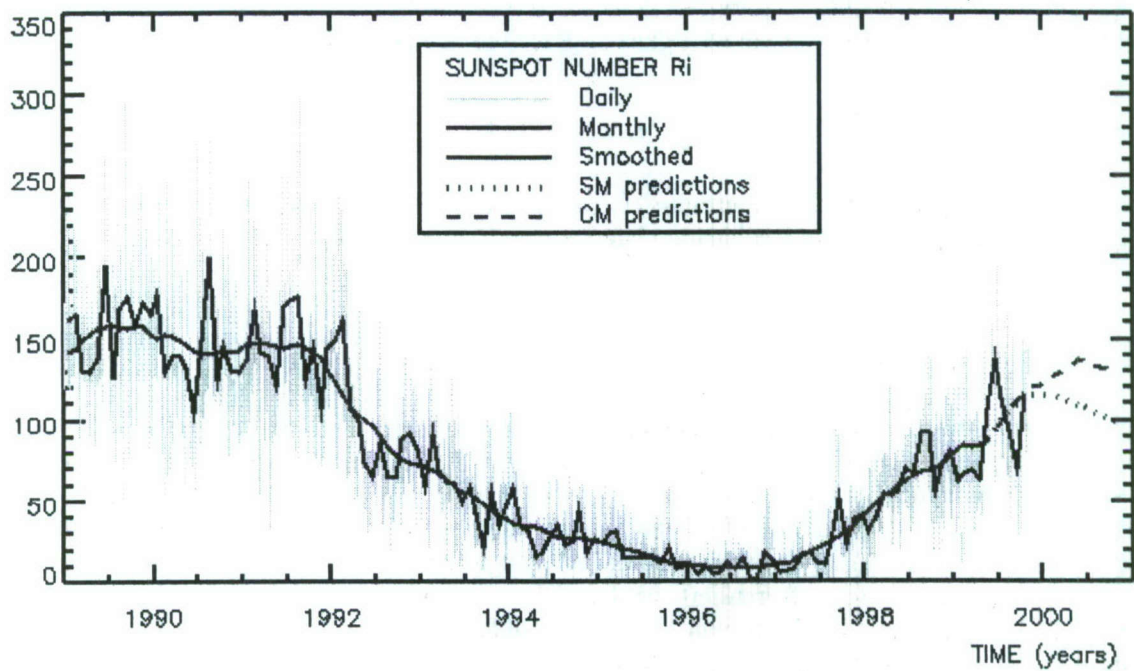


Abbildung 1: Sonnenflecken

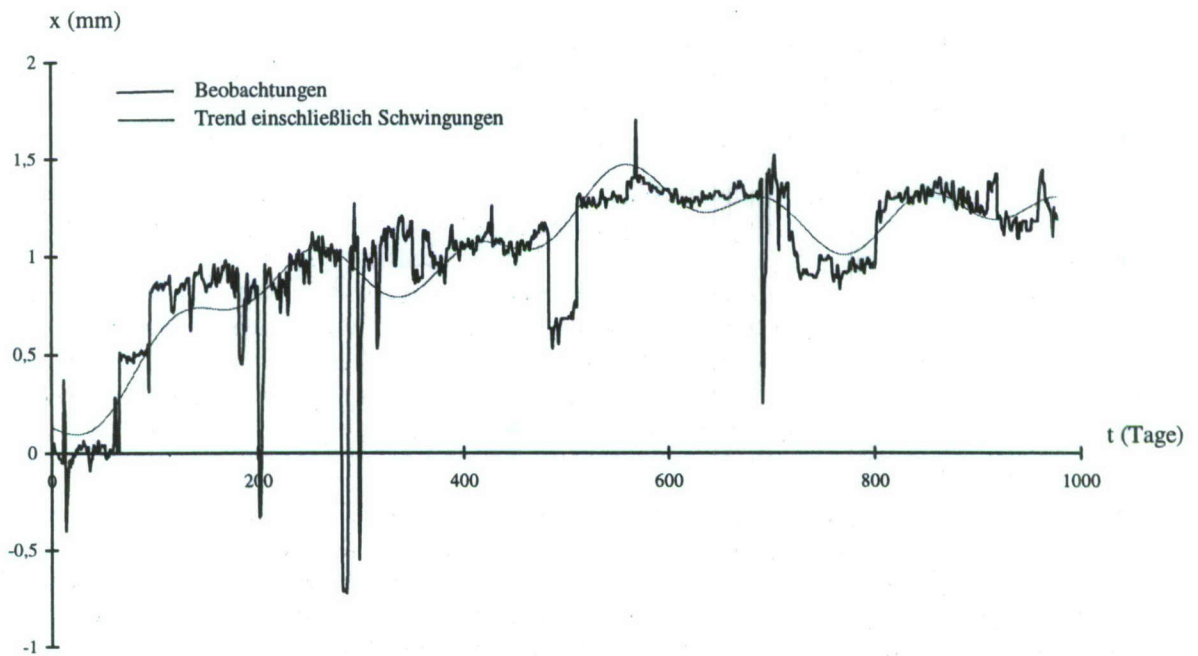


Abbildung 2: Horizontale Verschiebungen zwischen zwei Blöcken einer Staumauer, gemessen an einer Dehnungsfuge

2 Modelle im Zeitbereich

Die Folge (x_t) der Beobachtungen sei (zeitlich) geordnet nach $t = 1, 2, \dots, T$ mit $T \in \mathbb{N}$, und für jeden Wert t liege genau ein Meßwert vor. Als ganz allgemeines Modell für die Zeitreihe kann man

$$x_t = \xi_t + \eta_t + v_t \quad (2-1)$$

ansetzen. Dabei steht ξ_t für den deterministischen und η_t für den stochastischen Anteil des beobachteten Prozesses, während v_t den Beobachtungsfehler repräsentiert.

2.1 Funktionale Modelle

Bei Ingenieur Anwendungen der Zeitreihenanalyse steht häufig das als *Trend* bezeichnete deterministische Objektverhalten im Vordergrund, ganz besonders trifft dies bei Deformationsmessungen zu. Die Modellkomponenten η_t und v_t werden dann als Abweichungen bezüglich eines funktionalen Modells für ξ_t betrachtet. Dieses wird im einfachsten Fall als Polynom in t angenommen, kann aber auch durch eine Abklingfunktion, eine periodische Funktion oder irgend eine andere geeignete mathematische Beziehung zwischen x und t formuliert werden. Die Auswahl eines solchen *kinematischen* Modells erfolgt in der Regel auf der Basis von Fachwissen über das theoretische Objektverhalten und einer graphischen Darstellung der Beobachtungen als Funktion der Zeit.

$$\xi_t = f(t; \alpha) \quad (2-2)$$

Die Parameter α des gewählten Modells werden nach der Methode der kleinsten Quadrate geschätzt, wobei die minimierte Quadratsumme

$$\sum_{t=1}^T (x_t - f(t, \hat{\alpha}))^2 \quad (2-3)$$

als Gütemaß für die Anpassung des Modells dient. Ein nach dieser Vorgehensweise ermitteltes approximatives Verhaltensmodell eignet sich zur Beschreibung der zeitlichen Veränderungen eines beobachteten Objekts bis zum Zeitpunkt T und kann auch in begrenztem Umfang für Prognosen benutzt werden. Es läßt jedoch in der Regel keine Schlüsse auf Ursache-Wirkung Beziehungen zu.

Wenn solche Fragen untersucht werden sollen, ist es zweckmäßig, das Objekt als System aufzufassen. Neben der Zeitreihe (x_t) , die den Systemausgang beschreibt, sind dann, möglichst zu den selben Zeitpunkten $t = 1, 2, \dots, T$, die Eingangsgrößen y_t, z_t, \dots des Systems zu beobachten. Ziel der Auswertung ist es dann, die physikalischen Gesetzmäßigkeiten zwischen Systemeingang und Systemausgang zu modellieren. Wenn dies mit ausreichender Genauigkeit gelingt, können fundierte Prognosen über den beobachteten Prozeß gerechnet werden. Es gibt eine Reihe von Standardmethoden zur Entwicklung *dynamischer* Prozeßmodelle zwischen einem Eingangs- und einem Ausgangssignal. Wesentlich komplexer wird die Situation wenn mehrere Eingangs- und/oder Ausgangssignale zusammenwirken, wie es bei realen Prozessen häufig vorkommt.

Dynamische Modelle werden aus praktischen Gründen fast immer als lineare (linearisierte) parametrische Beziehungen formuliert. Ihr Erklärungswert hängt stark von dem eingebrachten Vorwissen ab. Sind die physikalischen Gesetze prinzipiell bekannt, so kann man ein sogenanntes "White-Box"-Modell aufstellen, in dem nur noch die Modellparameter zu schätzen sind. Ist dies nicht der Fall, so muß man auf empirische Methoden zurückgreifen, die zu einem "Grey-Box"-Modell führen. Schließlich besteht auch die Möglichkeit, die Eingangs-Ausgangs-Beziehung in Tabellen oder Kennlinien festzuhalten, also auf ein parametrisches Modell zu verzichten, und das System als "Black-Box" zu betrachten.

2.2 Lineare Filter

Eine weitere Möglichkeit, den funktionalen Anteil ξ_t von (2-1) herauszuarbeiten, besteht in der Filterung der Zeitreihe. Anstelle eines globalen parametrischen Modells wird dabei ein meist einfaches lineares Modell lokal angepaßt. Es entsteht daher kein geschlossener Ausdruck für ξ_t , sondern eine geglättete Folge von Werten (y_t), die weitgehend von den stochastischen Anteilen η_t und v_t befreit sind.

Die allgemeine Form eines linearen Filters lautet:

$$y_t = \sum_{k=-p}^q a_k x_{t-k} \quad (2-4)$$

Die häufigste Anwendung findet das *symmetrische Glättungsfilter*, das durch $p = q$ und $\sum a_k = 1$ gekennzeichnet ist. Die Folge der *Filtergewichte* (a_k) wird in der Regel mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate festgelegt. Wenn z.B. ein Polynom zweiten Grades an sieben aufeinanderfolgende Punkte angepaßt werden soll, so erhält man, wenn zunächst vorübergehend $t = k$ gesetzt wird, das lineare Gleichungssystem

$$x_k + v_k = b_0 + b_1 k + b_2 k^2, \quad k = -3, -2, \dots, +3$$

Die Forderung $\sum v_k^2 \rightarrow \min$ führt auf die Normalgleichungen

$$\begin{aligned} 7\hat{b}_0 + 28\hat{b}_2 &= \sum x_k \\ 14\hat{b}_1 &= \sum k x_k \\ 28\hat{b}_0 + 196\hat{b}_2 &= \sum k^2 x_k \end{aligned}$$

Da man den ausgeglichenen Wert nach (2-4) nur für $k = 0$ benötigt, muß lediglich der Parameter \hat{b}_0 berechnet werden. Aus der ersten und der dritten Normalgleichung erhält man

$$21\hat{b}_0 = 7\sum x_k - \sum k^2 x_k$$

Nach Einsetzen von $k = -3, -2, \dots, +3$ kann $\hat{b}_0 = y_0$ durch die Einzelwerte x_k ausgedrückt werden:

$$y_0 = \frac{1}{21}(-2x_{-3} + 3x_{-2} + 6x_{-1} + 7x_0 + 6x_1 + 3x_2 - 2x_3)$$

Man erhält in diesem Fall also die Filtergewichte

$$(a_k) = \frac{1}{21}\{-2, 3, 6, 7, 6, 3, -2\}$$

mit denen man nach Rückkehr zum Index t die Filterung gemäß (2-4) durchführt. Hätte man das Polynom nur an fünf Werte anpassen wollen, so hätten sich auf demselben Weg die Gewichte

$$(a_k) = \frac{1}{35}\{-3, 12, 17, 12, -3\}$$

ergeben. Häufig begnügt man sich mit der einfachen Mittelbildung über $n = 2p + 1$ Beobachtungen und erhält dafür die Gewichte

$$(a_k) = \frac{1}{n}\{1, 1, \dots, 1\}$$

Die Filtergleichung (2-4) wird häufig als *Faltungsgleichung* bezeichnet, da die Summation der Produkte als Faltung der Folgen (a_k) und (x_t) interpretiert werden kann. Wird das Ergebnis y_t ein zweites Mal gefiltert,

$$z_t = \sum_l b_l y_{t-l} \quad (2-5)$$

mit der Gewichtsfolge (b_l), so kann man die beiden Operationen zusammenfassen und erhält durch Faltung die Gewichtsfolge

$$c_m = \sum_l b_l a_{m-l} \quad (2-6)$$

mit der

$$z_t = \sum_m c_m x_{t-m} \quad (2-7)$$

unmittelbar aus der ursprünglichen Zeitreihe berechnet wird.

Die Glättungswirkung der beschriebenen Filter kann mit Hilfe der Varianzschätzung beurteilt werden. Wenn die Zeitreihe (x_t) als Filtereingang die Varianz σ_x^2 besitzt, so liefert das Varianzenfortpflanzungsgesetz für den Filterausgang (y_t)

$$\sigma_y^2 = \sigma_x^2 \sum_k a_k^2 \quad (2-8)$$

Die Summe der Quadrate der Filtergewichte wird als *Rauschverstärkung* bezeichnet. Für das quadratische Polynom über sieben Punkte erhält man z.B. den Faktor 0,33 und über fünf Punkte 0,49, während das einfache gleitende Mittel über m Punkte den Faktor $1/m$ besitzt.

Die bisher vorgestellten Filter eignen sich für die Rauschunterdrückung, um den deterministischen Signalanteil besser sichtbar zu machen. Eine andere Klasse von Filtern, die *Differenzfilter*, sollen im Gegensatz dazu deterministische Anteile eliminieren. Wenn ξ_t durch ein Polynom m -ten Grades modelliert werden kann, so enthalten die Differenzen Δx_t noch ein Polynom von Grad $m-1$ und die zweiten Differenzen $\Delta^2 x_t$ eines vom Grad $m-2$ und so weiter.

Die Differenzbildung kann solange fortgesetzt werden, bis lediglich stochastische Signalanteile übrig bleiben. Das einfache Differenzfilter ist durch

$$y_t := \Delta x_t = x_t - x_{t-1} \quad (2-9)$$

definiert. Es besitzt also die Gewichtsfolge $\{-1, 1\}$. Für das Differenzfilter zweiter Ordnung erhält man entsprechend

$$y_t := \Delta^2 x_t = \Delta x_t - \Delta x_{t-1} = x_t - 2x_{t-1} + x_{t-2}$$

und damit die Gewichtsfolge $\{1, -2, 1\}$. Ein Blick auf (2-4) zeigt, daß für diese Filter $p = 0$ gilt. Filter mit dieser Eigenschaft heißen *kausal*, da sie nur zurückliegende Werte benutzen. Die Summe der Gewichte ist beim Differenzfilter null, und der Rauschverstärkungsfaktor kann beträchtliche Werte annehmen, z.B. 2,0 für das Differenzfilter erster Ordnung und schon 6,0 für das zweite Ordnung. Man erkennt daran, daß die Ordnung m klein gehalten werden muß.

Wenn die Zeitreihe *zyklische Anteile* der Periode P enthält, so können diese durch ein Differenzfilter, das auf die Werte x_t und x_{t-P} zugreift, eliminiert werden.

$$\Delta_p x_t = x_t - x_{t-p} \quad (2-10)$$

Dies kann z.B. zur Beseitigung des Einflusses des täglichen und jährlichen Temperaturgangs sinnvoll sein.

Beim Glättungsfilter und auch beim Differenzfilter tritt das Problem auf, daß an den Enden der Zeitreihe von $t = 1$ bis q und von $t = T - p$ bis T die Standardfaltung nicht durchgeführt werden kann. Man muß dort entweder das Filter modifizieren oder mit Hilfe der linearen Prädiktion die Zeitreihe verlängern.

Filter bei denen der Ausgang y_t nur aus den Werten x_t der Zeitreihe gebildet wird, heißen *nichtrekursiv*. Ebenso wichtig sind *rekursive Filter*, bei denen auch zurückliegende gefilterte Werte y_t genutzt werden. Das wichtigste Beispiel eines rekursiven Filters ist das *Kalman-Filter*. Der Filterausgang y_t wird hier aus dem vorhergehenden Wert y_{t-1} und der Beobachtung x_t gefiltert. Dazu prädiziert man zunächst

$$\tilde{y}_t = A_{t-1,t} y_{t-1} + B_{t-1,t} \omega_t \quad (2-11)$$

mit der *Systemgleichung* (2-11) und führt dann mit der *Beobachtungsgleichung* (2-12) eine

$$x_t = C_t y_t + v_t \quad (2-12)$$

Korrektur durch

$$\hat{y}_t = \tilde{y}_t + K_t (x_t - \tilde{x}_t) \quad (2-13)$$

Die *Verstärkungsmatrix* K_t wird unter Berücksichtigung der Kovarianzmatrizen von v_t und ω_t gebildet, und \tilde{x}_t ist die mit \tilde{y}_t aus der Beobachtungsgleichung (2-12) berechnete Prädiktion der Beobachtung x_t . Die Differenz $x_t - \tilde{x}_t$ wird als *Innovation* bezeichnet.

2.3 Stochastische Modelle

Wenn die beobachtete Zeitreihe durch zufällige Schwankungen um ein mittleres Niveau oder um einen gut modellierbaren deterministischen Trend geprägt ist, kann die Differenz $x_t - \hat{x}_t$ als Realisierung eines Stochastischen Prozesses (X_t) betrachtet werden. Dazu wird in der Regel vorausgesetzt, daß die trendbereinigten Meßwerte $x_t := x_t - \hat{x}_t$ stationär sind. Dies ist dann der Fall, wenn die Beobachtungen x_t als Realisationen von Zufallsvariablen X_t , die alle dieselbe Verteilung besitzen, aufgefaßt werden können. Für die meisten Anwendungen reicht schon die abgeschwächte Forderung aus, daß alle Variablen des stochastischen Prozesses (X_t) dieselben ersten und zweiten Momente haben. Das stochastische Verhalten wird dann ganz durch die Struktur der Autokovarianzfunktion gesteuert.

Bei der Modellbildung stützt man sich auf die aus der Zeitreihe geschätzten *empirischen Autokovarianzen* und beschränkt sich auf lineare Beziehungen mit einer möglichst geringen Anzahl von unbekannten Parametern. Ein häufig verwendetes Modell stellt die Beobachtung x_t als Linearkombination zurückliegender Werte überlagert mit *weißem Rauschen* dar.

$$x_t = \alpha_1 x_{t-1} + \alpha_2 x_{t-2} + \dots + \alpha_p x_{t-p} + \varepsilon_t \quad (2-14)$$

Da (2-14) die Struktur eines Regressionsmodells hat, dessen "unabhängige" Variablen frühere Meßwerte sind, bezeichnet man (2-14) als *autoregressives Modell* der Ordnung p , oder kurz AR(p)-Modell. Der zusätzlich auftretende Zuwachs ε_t wird dabei als weißes Rauschen angenommen, d.h. für alle t gilt $E(\varepsilon_t) = 0$, $E(\varepsilon_t \varepsilon_{t+k}) = \sigma_\varepsilon^2$ für $k = 0$ und $E(\varepsilon_t \varepsilon_{t+k}) = 0$ für $k \neq 0$. Stellt man nun die Beobachtungen x_{t-1}, x_{t-2}, \dots entsprechend der autoregressiven Beziehung (2-14) als Linearkombination zurückliegender Beobachtungen dar und setzt sie anschließend in (2-14) ein, so erhält man ein Modell, in dem auf der rechten Seite eine gewichtete Summe von Realisierungen des weißen Rauschens (ε_t) steht:

$$x_t = \varepsilon_t + \beta_1 \varepsilon_{t-1} + \beta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \beta_k \varepsilon_k \quad (2-15)$$

Gleichung (2-15) mit $\beta_0 = 1$ wird als *gleitendes Mittel* (moving average) der Ordnung ∞ , oder kurz als MA(∞)-Modell bezeichnet. Bei der praktischen Anwendung wird häufig analog zu (2-15) ein MA(q)-Modell gewählt, das gewöhnlich als

$$x_t = \varepsilon_t - \beta_1 \varepsilon_{t-1} - \beta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \beta_q \varepsilon_{t-q} \quad (2-16)$$

dargestellt wird. Durch Einsetzen der $\varepsilon_t, \varepsilon_{t-1} \dots$ aus dem AR-Modell (2-14) kann (2-16) in ein $AR(\infty)$ -Modell überführt werden.

Die Koeffizienten α und β dürfen nur solche Werte annehmen, die sicherstellen, daß ein *stationäres Modell* der Zeitreihe entsteht. Dazu ist es erforderlich, daß die Koeffizientenfolge der durch rückwärtiges Einsetzen (Inversion) entstehenden $MA(\infty)$ - bzw. $RA(\infty)$ -Modelle *absolut summierbar* ist. Weitere mathematische Details findet man in den Fachbüchern, z.B. (Schlittgen/Streitberg 1989). Ein Vergleich mit der Filtergleichung (2-4) zeigt, daß das $AR(p)$ -Modell (2-14) als rekursives kausales Filter interpretiert werden kann, während das $MA(q)$ -Modell ein nichtrekursives kausales Filter darstellt.

Es liegt nun nahe zur Modellierung von Zeitreihen die Gleichungen (2-14) und (2-16) zu kombinieren. Es entsteht dann ein $ARMA(p, q)$ -Modell der Form

$$x_t = \alpha_1 x_{t-1} + \dots + \alpha_p x_{t-p} + \varepsilon_t - \beta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \beta_q \varepsilon_{t-q}, \quad (2-17)$$

das fast immer zur Anpassung an eine Zeitreihe weniger unbekannte Koeffizienten benötigt als ein reines MA -oder AR -Modell.

2.4 Das Beobachtungsrauschen

Das Modell (2-1), in dem die Zeitreihe als Summe aus deterministischem *Trend* ξ_t , stochastischem *Signal* η_t und *Meßrauschen* v_t dargestellt ist, wird in der Geodäsie als Kollokationsmodell bezeichnet. Es wurde für die Interpolation bzw. Prädiktion von Schwerewerten entwickelt und ist in der Literatur ausführlich dargestellt. Wesentlich für die Trennung von Signal- und Rauschanteilen ist, daß diese unabhängig voneinander sind. Nach Abspalten des Trends erhält man für die Zeitreihe

$$x_t = \eta_t + v_t \quad (2-18)$$

Wenn der Signalanteil η_t als $ARMA$ -Prozeß modellierbar ist, so gilt dies auch für x_t . Allerdings werden sich die Ordnung des Modells und die Parameter ändern. Eine Trennung von η_t und v_t ist im allgemeinen nicht möglich. Nur in dem Spezialfall, daß v_t als *weißes normales Rauschen* zu betrachten ist, d.h. wenn $v_t \sim N(0, \sigma_v^2)$ und $E(v_t v_{t+k}) = 0 \quad \forall t \text{ und } k \neq 0$ gilt, lassen sich die Varianzen σ_ε^2 des Prozeßrauschens und σ_v^2 des Meßrauschens simultan schätzen. Dazu wurde von (Chen 1996) ein iterativer kleinste Quadrate Schätzer für die Modellparameter mit einem Varianzkomponenten Schätzer kombiniert. Der verschachtelte Algorithmus erfordert beträchtlichen rechnerischen Aufwand, führt aber zuverlässig zum Ziel, wie mit umfangreichen Simulationsrechnungen nachgewiesen wurde.

3 Parameterschätzung in $ARMA$ -Modellen

Die Schätzung der Parameter eines $AR(p)$ -Modells ist relativ einfach. Man faßt (2-14) als lineares Regressionsmodell auf und minimiert im Sinne der Methode der kleinsten Quadrate die Form q

$$q = \sum_{t=p+1}^T \left(x_t - \sum_{k=1}^p \hat{\alpha}_k x_{t-k} \right)^2. \quad (3-1)$$

Dies führt auf das folgende System von Normalgleichungen

$$\begin{aligned} c_{11}\hat{\alpha}_1 + \dots + c_{1p}\hat{\alpha}_p &= c_{01} \\ c_{21}\hat{\alpha}_1 + \dots + c_{2p}\hat{\alpha}_p &= c_{02} \\ \vdots & \quad \quad \quad \vdots \\ c_{p1}\hat{\alpha}_1 + \dots + c_{pp}\hat{\alpha}_p &= c_{0p} \end{aligned} \quad (3-2)$$

mit $c_{ij} = \sum_{t=p+1}^T x_{t-i} x_{t-j}$, die als empirische *Yule-Walker Gleichungen* bezeichnet werden.

Häufig findet man eine zu (3-2) äquivalente Darstellung der Normalgleichungen mit c_k anstelle von c_{ij} , wobei $k = |i - j|$ gesetzt und die Produktsumme durch T dividiert wird.

$$c_k = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T-k} x_t x_{t+k} \quad (3-3)$$

Man erkennt sogleich an (3-3), daß wegen der Annahme $E(x_t) = 0 \forall t$, c_0 eine Schätzung der Varianz des Prozesses und $c_k \forall k > 0$ eine der Kovarianzen ist. Der Index k ist dabei der zeitliche Abstand der betrachteten Beobachtungen.

Werden nun alle c_k durch c_0 dividiert, so erhält man die empirischen Korrelationen r_k der Zeitreihe, mit denen man die Normalgleichungen (3-2) ebenfalls ausdrücken kann. Die Struktur der stochastischen Abhängigkeiten innerhalb der Zeitreihe, die durch c_k bzw. r_k geschätzt wird, ist die wichtigste Grundlage für die Modellbildung und die Parameterschätzung.

Die Beurteilung der Güte der Modellanpassung und die Festlegung der Anzahl p der notwendigen Glieder in (2-14) erfolgt durch Vergleich der aus den Residuen geschätzten Varianz s_ε^2 mit der Prozeßvarianz $s_x^2 = c_0$.

Die Parameterschätzung im MA(q)-Modell (2-16) erfolgt ebenfalls meist auf der Grundlage der geschätzten Autokovarianzen. Auf Modellebene erhält mit $\beta_0 = -1$ die theoretischen Werte

$$\gamma_k = \sigma_\varepsilon^2 \sum_{l=0}^{q-k} \beta_l \beta_{l+k}, \quad k=0, 1, \dots, q \quad (3-4)$$

wobei ε_t als weißes Rauschen vorausgesetzt wird. Setzt man in (3-4) die geschätzten Kovarianzen $\hat{\gamma}_k = c_k$ für $k=0, 1, \dots, q$ ein, so erhält man $q+1$, allerdings nichtlineare, Gleichungen für die $q+1$ gesuchten Koeffizienten β_k , deren Lösung iterativ erfolgt. Dazu multipliziert man (3-4) aus und erhält zunächst

$$\begin{aligned} c_0 &= (1 + \hat{\beta}_1^2 + \hat{\beta}_2^2 + \dots + \hat{\beta}_q^2) s_\varepsilon^2 \\ c_k &= (-\hat{\beta}_k + \hat{\beta}_1 \hat{\beta}_{k+1} + \hat{\beta}_2 \hat{\beta}_{k+2} + \dots + \hat{\beta}_{q-k} \hat{\beta}_q) s_\varepsilon^2 \\ c_k &= 0 \quad \text{für } k > q \end{aligned} \quad (3-5)$$

Die Auflösung nach s_ε^2 und $\hat{\beta}_k$ führt auf

$$\begin{aligned} s_\varepsilon^2 &= c_0 / (1 + \hat{\beta}_1^2 + \hat{\beta}_2^2 + \dots + \hat{\beta}_q^2) \\ \hat{\beta}_k &= -c_k / s_\varepsilon^2 + \hat{\beta}_1 \hat{\beta}_{k+1} + \dots + \hat{\beta}_{q-k} \hat{\beta}_q \end{aligned} \quad (3-6)$$

Im ersten Schritt werden $\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_q$ zu null gesetzt. Dies liefert die erste Näherung für s_ε^2 , die in die Gleichungen für $\hat{\beta}_k$ eingesetzt wird. Man berechnet nun der Reihe nach Näherungen für

$\hat{\beta}_q, \hat{\beta}_{q-1}, \dots, \hat{\beta}_1$, die zu einem verbesserten s_ε^2 führen und erzielt nach wenigen Iterationen Konvergenz des Verfahrens, sofern die geschätzten Autokovarianzen eine positiv definite Autokovarianzfunktion repräsentieren. Es gibt eine Reihe von Weiterentwicklungen und Varianten dieses einfachen Verfahrens, die vor allem zur Beschleunigung der Konvergenz dienen.

Für die Schätzung der Parameter $\sigma_\varepsilon^2, \alpha_k, \beta_k$ von ARMA-Modellen sind Maximum-Likelihood-Schätzer entwickelt worden, die allerdings sehr aufwendig sind. Wir wollen uns hier auf die Darstellung einfacher Verfahren beschränken, die für alle praktischen Fälle zu befriedigenden Ergebnissen führen.

Ignoriert man zunächst den MA-Anteil von (2-17), so kann man sich mit Hilfe der Yule-Walker-Gleichungen (3-2) erste Werte für $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$ verschaffen. Multipliziert man nun die Gleichung (2-17) mit x_{t-k} und bildet die Erwartungswerte, so erhält man

$$\gamma_k = \alpha_1 \gamma_{k-1} + \alpha_2 \gamma_{k-2} + \dots + \alpha_p \gamma_{k-p} + E(\varepsilon_t x_{t-k}) - \sum_{l=1}^q \beta_l E(\varepsilon_{t-l} x_{t-k})$$

Ein Blick auf (2-16) zeigt, daß x_{t-k} nur von $\varepsilon_{t-k}, \varepsilon_{t-k-1}, \varepsilon_{t-k-2}, \dots$ für $k \leq q$ abhängt. Alle Erwartungswerte mit ε_t und ε_{t-l} verschwinden daher für $k > q$, und man erhält für $k = q+1, q+2, \dots, q+p$ folgendes Gleichungssystem

$$\begin{aligned} \gamma_{q+1} &= \gamma_q \alpha_1 + \gamma_{q-1} \alpha_2 + \dots + \gamma_{q+1-p} \alpha_p \\ \gamma_{q+2} &= \gamma_{q+1} \alpha_1 + \gamma_q \alpha_2 + \dots + \gamma_{q+2-p} \alpha_p \\ &\vdots \\ \gamma_{q+p} &= \gamma_{q+p-1} \alpha_1 + \gamma_{q+p-2} \alpha_2 + \dots + \gamma_p \alpha_p \end{aligned} \quad (3-7)$$

Setzt man die empirischen Autokovarianzen $\hat{\gamma}_k = c_k$ ein, so liefert die Lösung von (3-7) Schätzungen $\hat{\alpha}$ für die gesuchten AR-Koeffizienten. Mit diesen erhält man nach (2-14)

$$x_t - \hat{\alpha}_1 x_{t-1} - \hat{\alpha}_2 x_{t-2} - \dots - \hat{\alpha}_p x_{t-p} = y_t$$

Wird nun y_t durch das MA-Modell (2-16) ausgedrückt,

$$y_t = \varepsilon_t - \beta_1 \varepsilon_{t-1} - \beta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \beta_q \varepsilon_{t-q}$$

so kann man die Parameter β nach (3-4) schätzen.

Die auf diesem Wege ermittelten Schätzwerte sind konsistent, jedoch nicht effizient. Ähnliche Eigenschaften hat das folgende auf einem Regressionsansatz basierende Verfahren.

Die Ausdrücke mit ε in (2-17) werden zunächst zusammengefaßt, so daß ein AR(p)-Modell entsteht, in dem nach (3-2) Schätzungen für α berechnet werden. Werden diese nun in (2-14) eingesetzt, so erhält man die Residuen

$$v_t = x_t - \hat{\alpha}_1 x_{t-1} - \hat{\alpha}_2 x_{t-2} - \dots - \hat{\alpha}_p x_{t-p} \quad (3-8)$$

die für die ε in (2-17) substituiert werden. Anschließend werden Schätzungen für die Koeffizienten α und β durch Minimierung von

$$\sum_{t=1}^T (x_t - \alpha_1 x_{t-1} - \dots - \alpha_p x_{t-p} + \beta_1 v_{t-1} + \dots + \beta_q v_{t-q})^2 \Rightarrow \min \quad (3-9)$$

berechnet.

Da die Modellordnung zunächst unbekannt ist, werden die Verfahren für mehrere Kombinationen $\{p, q\}$ durchgeführt. Die Güte der Anpassung wird durch Vergleich der Restvarianzen beurteilt.

Da die x_t und v_t für $t \leq 0$ unbekannt sind, läßt man entweder die Summe der Quadrate (3-9) bei $t = \max\{p, q\}$ beginnen, was bei großem T unproblematisch ist, oder man setzt für diese Werte null ein. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Werte rückwärts zu präzisieren. Dies ist wegen der angenommenen Kovarianzstruktur $\text{Cov}(x_t, x_{t+k}) = \text{Cov}(x_t, x_{t-k})$ stets möglich. Die zu (2-17) äquivalente Gleichung lautet

$$x_t = \alpha_1 x_{t+1} + \dots + \alpha_p x_{t+p} + \varepsilon_t - \beta_1 \varepsilon_{t+1} - \dots - \beta_q \varepsilon_{t+q} \quad (3-10)$$

Mit den nach (3-9) geschätzten Näherungswerten für α und β berechnet man approximative Werte v für ε :

$$\begin{aligned} v_T &= x_T \\ v_{T-1} &= x_{T-1} - \hat{\alpha}_1 x_T + \hat{\beta}_1 v_T \\ &\vdots \\ v_1 &= x_1 - \hat{\alpha}_1 x_2 - \dots - \hat{\alpha}_p x_{p+1} + \hat{\beta}_1 v_2 + \dots + \hat{\beta}_q v_{q+1} \end{aligned} \quad (3-11)$$

und mit diesen schließlich

$$\begin{aligned} x_0 &= \hat{\alpha}_1 x_1 + \dots + \hat{\alpha}_p x_p - \hat{\beta}_1 v_1 - \dots - \hat{\beta}_q v_q \\ &\vdots \\ x_{-1} &= \hat{\alpha}_1 x_{1-1} + \dots + \hat{\alpha}_p x_{p-1} \end{aligned} \quad (3-12)$$

wobei für die unbekannten ε bzw. v der Erwartungswert null gesetzt wird.

4 Modelle im Frequenzbereich

Die bisherigen Darstellungen beziehen sich auf die Analyse im Zeitbereich. Alternativ dazu und als Ergänzung empfiehlt es sich oft, eine Analyse im Frequenzbereich durchzuführen, die zu zusätzlichen Erkenntnissen führen kann. Die Grundlage dafür bildet die Tatsache, daß jede periodische Funktion mit beliebiger Genauigkeit als Summe *harmonischer Schwingungen* darstellbar ist. Als harmonische Schwingung bezeichnet man die Funktion

$$y(t) = a \cos(\omega t - \varphi) = a_1 \cos \omega t + a_2 \sin \omega t. \quad (4-1)$$

Wenn P die *Periodenlänge* und $f = 1/P$ die *Frequenz* ist, so folgt mit $\omega = 2\pi f$ die *Kreisfrequenz* der Schwingung. Ihre *Amplitude* ist durch a und die *Phasenverschiebung* durch φ gegeben. Für praktische Anwendungen wird meist die Summendarstellung von (4-1) benutzt, aus deren Parametern man mit $a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$ und $\varphi = \arctan a_2/a_1$ leicht die ursprüngliche Darstellung zurückgewinnen kann.

Soll eine endliche Zeitreihe (x_t) durch eine Summe harmonischer Schwingungen approximiert werden, so wählt man zweckmäßiger Weise die Frequenzen $f = k/T$ bzw. $\omega = 2\pi k/T$ mit $k = 1, 2, \dots$ und $k < T/2$, die als *Fourierfrequenzen* bezeichnet werden, und eine orthogonale Basis zur Darstellung von (x_t) bilden. Beschränkt man sich auf diese Frequenzen so gilt

$$\sum_{t=1}^T \cos \omega t \sin \omega t = 0 \quad (4-2)$$

$$\sum_{t=1}^T \cos^2 \omega t = \sum_{t=1}^T \sin^2 \omega t = T/2,$$

was die Berechnungen und die Interpretation wesentlich erleichtert.

Sei nun $h(t) = a_1 \cos \omega t + a_2 \sin \omega t$ eine *Harmonische*, die an x_t im Sinne der Methode der kleinsten Quadrate angepaßt werden soll, so ist unter der Annahme $E(x_t) = 0$ der Ausdruck $\sum_{t=1}^T (x_t - \hat{h}(t))^2$ zu minimieren. Unter Berücksichtigung von (4-2) zerfallen die Normalgleichungen, und man erhält

$$\begin{aligned}\hat{a}_1 &= \frac{2}{T} \sum_t x_t \cos \omega t = 2C(\omega) \\ \hat{a}_2 &= \frac{2}{T} \sum_t x_t \sin \omega t = 2S(\omega)\end{aligned}\quad (4-3)$$

mit den offensichtlichen Abkürzungen $C(\omega) = \frac{1}{T} \sum_t x_t \cos \omega t$ und $S(\omega) = \frac{1}{T} \sum_t x_t \sin \omega t$.

Wie man sofort abliest, kann $C(\omega)$ als Kovarianz von x_t und $\cos \omega t$ sowie $S(\omega)$ als Kovarianz von x_t und $\sin \omega t$ interpretiert werden. Diese Größen sind daher ein Maß für die Stärke der linearen stochastischen Beziehung zwischen der Zeitreihe und der angepaßten Harmonischen. Auch die Quadratsumme der Residuen $q = \sum (x_t - \hat{a}_1 \cos \omega t - \hat{a}_2 \sin \omega t)^2$ ist ein Maß für die Güte der Anpassung. Multipliziert man diesen Ausdruck nun aus und berücksichtigt (4-2), so folgt

$$q = \sum_t (x_t^2 - 2x_t \hat{a}_1 \cos \omega t - 2x_t \hat{a}_2 \sin \omega t + \hat{a}_1^2 \cos^2 \omega t + \hat{a}_2^2 \sin^2 \omega t)$$

Setzt man schließlich noch (4-3) ein, so erhält man die Lösung

$$q = \sum_t x_t^2 - 2T(C(\omega)^2 + S(\omega)^2) \quad (4-4)$$

Die Verallgemeinerung für n harmonische Schwingungen lautet, wenn ω_i , $i = 1, 2, \dots, n$, Fourierfrequenzen sind

$$q_n = \sum_t x_t^2 - 2T \sum_{i=1}^n (C(\omega_i)^2 + S(\omega_i)^2). \quad (4-5)$$

Jede Harmonische verkleinert die Quadratsumme der Residuen (4-5) und alle Beiträge, die im wesentlichen durch $C(\omega)^2 + S(\omega)^2$ bestimmt sind, sind unabhängig voneinander. Die Analyse der Beiträge der einzelnen Harmonischen erfolgt in der Regel mit Hilfe der Funktion

$$I(\omega) = T(C(\omega)^2 + S(\omega)^2) \quad (4-6)$$

die als *Periodogramm* oder *Stichprobenspektrum* bezeichnet wird. Man liest an (4-6) ab, daß $I(\omega)$ eine stets positive und gerade Funktion ist. Es genügt daher, Werte für $\omega \in [0, \pi]$ zu berechnen.

Das Periodogramm kann auf zweierlei Weise benutzt werden. Wenn in einer Zeitreihe offensichtliche Periodizitäten auftreten, so kann man ω in kleinen Schritten in der Umgebung der vermuteten Frequenz variieren und am Maximum von $I(\omega)$ die genaue Frequenz ablesen. Diese Vorgehensweise, die auch zur Identifikation mehrerer Frequenzen verallgemeinert werden kann, wird vorwiegend gewählt, wenn die Schwingungen der deterministischen Komponente des Zeitreihenmodells (2-1) zugerechnet werden.

Soll hingegen eine stationäre Zeitreihe mit $E(x_t) = 0$ in den Frequenzbereich transformiert werden, um verborgene Periodizitäten aufzudecken, so wird dies durch Berechnung des Periodogramms an allen Fourierfrequenzen erreicht.

Allerdings bereitet die Interpretation des Periodogramms einige Schwierigkeiten, die durch die Abtastung des eigentlich kontinuierlichen Signals und durch die begrenzte Anzahl T der beobachteten Werte x_t verursacht werden. Die Gipfel im Periodogramm sind meist breit, so daß eher ein Frequenzband als eine spezielle Frequenz ω ablesbar ist. Die Frequenzanteile sickern in die Nachbarschaft der Frequenz ω durch (*Leakage-Effekt*). Kurzwellige Schwingungen im Signal können wegen des Beobachtungsabstandes, so abgetastet werden, daß sie als scheinbar langwellige auftreten (*Aliasing*). Ausgeprägte Wellen mit der Frequenz ω erzeugen oft Oberschwingungen mit den Frequenzen $2\omega, 3\omega, \dots$. Diese treten insbesondere dann auf, wenn der mit ω periodische Signalverlauf stark von der Sinusform abweicht (*Harmonics*).

Weiterführende Analysen im Frequenzbereich werden durch den Einsatz der *Fouriertransformation* möglich. Diese wird meist mit der *Eulerschen* Darstellung einer Schwingung

$$e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t$$

erläutert, die auf die Ausdrücke $C(\omega)$ und $S(\omega)$ nach (4-3) übertragen werden kann und die Größe

$$D(\omega) = C(\omega) + i S(\omega) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_t e^{i\omega t} \quad (4-7)$$

definiert, welche den wesentlichen Beitrag der Frequenz ω zum Periodogramm charakterisiert. Es gilt nämlich offensichtlich $I(\omega) = T |D(\omega)|^2$. Man läßt nun $-\infty \leq t \leq +\infty$ zu und bezeichnet die Größe

$$F(\omega) = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} x_t e^{i\omega t} = \sum x_t \cos \omega t + i \sum x_t \sin \omega t \quad (4-8)$$

als *Fouriertransformierte* von (x_t) , deren Existenz die absolute Summierbarkeit der Folge (x_t) voraussetzt. Ohne auf weitere Einzelheiten einzugehen, sei erwähnt, daß aus $F(\omega)$ die Zeitreihe ohne Informationsverlust durch die Umkehrtransformation

$$x_t = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (4-9)$$

zurückgewonnen werden kann. Die Zeitreihe (x_t) und die Funktion $F(\omega)$ werden *Paar von Fouriertransformierten* bezeichnet.

5 Kovarianz und Korrelation

In den bisherigen Ausführungen trat mehrfach die Kovarianz als wichtige Kenngröße einer Zeitreihe auf. Der Schätzwert der Kovarianz von zwei im Abstand $t_j - t_i = k$ stehenden Beobachtungen einer stationären Zeitreihe wird nach

$$c_k = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T-k} (x_t - \hat{x})(x_{t+k} - \hat{x}) \quad (5-1)$$

berechnet. Für $k = 0$ liefert (5-1) die Varianz $c_0 = s_x^2$ der Reihe. Der nach (5-1) berechnete Schätzwert

ist nicht erwartungstreu. Um diese Eigenschaft zu erreichen, müßte der Nenner T durch $T-k-1$ ersetzt werden. Dies unterbleibt jedoch in der Regel, da für großes T der Unterschied gering ist und durch (5-1) sichergestellt ist, daß die mit dem c_k gebildete Kovarianzmatrix der Zeitreihe

$$\text{Cov}(x_t) = \begin{pmatrix} c_0 & c_1 & c_2 & \dots & c_n \\ c_1 & c_0 & c_1 & \dots & c_{n-1} \\ \vdots & & & & \\ c_n & c_{n-1} & c_{n-2} & \dots & c_0 \end{pmatrix} \quad (5-2)$$

positiv definit geschätzt wird. Der maximale Abstand n zweier Beobachtungen, deren Kovarianz noch berechnet wird sollte $T/4$ nicht überschreiten.

Dividiert man die Kovarianzen der Matrix (5-2) durch c_0 , so erhält man die Korrelationsmatrix R deren Elemente im Intervall $-1 \leq r_k \leq +1$ liegen. Beide Kenngrößen, c_k und r_k , sind ein Maß für die lineare stochastische Abhängigkeit von zwei in zeitlichem Abstand von k Einheiten aufgetretenen Beobachtungen. Dieses Abhängigkeitsmaß ist nicht frei vom Einfluß der anderen Beobachtungen. Man definiert daher als weiteres Maß für die lineare Abhängigkeit den *partiellen Korrelationskoeffizienten* π_k , der vom Einfluß der $k-1$ Werte, die zwischen x_t und x_{t+k} liegen, befreit ist. Man erreicht dies, indem man x_t und x_{t+k} durch die dazwischen liegenden Werte im Sinne der Methode der kleinsten Quadrate prädiziert

$$\begin{aligned} \hat{x}_t &= a_1 x_{t+1} + a_2 x_{t+2} + \dots + a_{k-1} x_{t+k-1} \\ \hat{x}_{t+k} &= a_1 x_{t+k-1} + a_2 x_{t+k-2} + \dots + a_{k-1} x_{t+1} \end{aligned} \quad (5-3)$$

Wegen der Symmetrie der Korrelationsstruktur, $\rho_k = \rho_{-k}$, treten in beiden Gleichungen (5-3) dieselben Koeffizienten a_i auf. Der partielle Korrelationskoeffizient ist als Korrelation zwischen $(x_t - \hat{x}_t)$ und $(x_{t+k} - \hat{x}_{t+k})$ definiert.

$$\pi_k = \frac{\text{Cov}(x_t - \hat{x}_t, x_{t+k} - \hat{x}_{t+k})}{\text{Var}(x_t - \hat{x}_t)} \quad (5-4)$$

Seine Berechnung ist relativ einfach, da man die Koeffizienten a_i durch ein den Yule-Walker-Gleichungen (3-2) entsprechendes lineares Gleichungssystem (5-5) ermitteln kann. Durch Umformung von (5-4) kann gezeigt werden, daß π_k gleich dem Koeffizienten a_k ist, der bei der Prädiktion von \hat{x}_t durch die folgenden k Werte entsteht.

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_0 & \gamma_1 & \gamma_2 & \dots & \gamma_{k-1} \\ \gamma_1 & \gamma_0 & \gamma_1 & \dots & \gamma_{k-2} \\ \vdots & & & & \vdots \\ \gamma_{k-1} & \gamma_{k-2} & & & \gamma_0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_k \end{pmatrix} \quad (5-5)$$

Die partiellen Korrelationskoeffizienten stehen in enger Beziehung zu den Koeffizienten α_i eines AR-Prozesses (2-14) und werden hauptsächlich zur Bestimmung der Ordnung des Prozesses genutzt. Für einen AR(2)-Prozeß findet man z.B. $\pi_2 = \alpha_2$ und $\pi_1 = \alpha_1 / (1 - \alpha_2)$.

Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung der Kovarianzstruktur einer stationären Zeitreihe bietet das *Variogramm*, das vorwiegend in der Geostatistik benutzt wird. Es ist definiert als Funktion des zeitlichen Abstandes k

$$\text{Var}(x_{t+k} - x_t) = E(x_{t+k} - x_t)^2 = 2\delta_k \quad (5-6)$$

und steht über $2\delta_k = 2\gamma_0 - 2\gamma_k$ mit der Autokovarianz in Verbindung. Die Größe $\delta_k = \gamma_0 - \gamma_k$ wird als *Semivariogramm* bezeichnet. In der Praxis wird das Variogramm nicht nach (5-6) aus den Autokovarianzen berechnet, sondern aus den Differenzen $x_{t+k} - x_t$ geschätzt. Diese Differenzbildung hat den Vorteil, daß lokale Trends und andere Verletzungen der Forderung $E(x_t) = 0$ weitgehend eliminiert werden. Die statistische Methode *Kriging*, die auf dem Variogramm basiert, ist für die Prädiktion von Signalwerten für Zeitpunkte, an denen keine Beobachtung vorliegt oder eine Beobachtung offensichtlich grob fehlerhaft ist, vorzüglich geeignet. Ihre Anwendung in der Zeitreihenanalyse wird in (CHEN 1996) ausführlich erörtert.

Gewöhnlich wird die Autokorrelation oder das Variogramm als Funktion des Abstandes k graphisch dargestellt. Diese Graphik ermöglicht eine Beurteilung der Abhängigkeitsstruktur der Zeitreihe und läßt Periodizitäten erkennen. Letzteres hängt mit der engen Beziehung zwischen Periodogramm (4-6) und Autokovarianz (5-1) zusammen. Es gilt nämlich

$$I(\omega) = c_0 + 2 \sum_{k=1}^{T-1} c_k \cos k\omega \quad (5-7)$$

Geht man auf die komplexe Darstellung über und läßt unter Berücksichtigung von $c_k = c_{-k}$ den Abstand k von $-(T-1)$ bis $+(T-1)$ laufen, so geht (5-7) über in

$$I(\omega) = \sum_{k=-(T-1)}^{T-1} c_k e^{ik\omega} \quad (5-8)$$

Ein Vergleich mit (4-8) zeigt, daß $I(\omega)$ die Fouriertransformierte von (c_k) ist. Das Periodogramm enthält alle Kovarianzen, auch die mit großem Abstand k zwischen den Beobachtungen, bis zu $k = T-1$, die sich nur sehr ungenau schätzen lassen. Als Folge davon ist es mit Unsicherheiten behaftet, die die Interpretation stark beeinträchtigen können. Der Übergang vom empirischen Periodogramm (5-8) zu der theoretischen Version auf Modellebene erfolgt einfach dadurch, daß die empirische Kovarianz c_k durch die theoretische Größe γ_k ersetzt wird und man $T \rightarrow \infty$ gehen läßt

$$f(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \gamma_k e^{ik\omega} \quad (5-9)$$

$f(\omega)$ ist die *Spektraldichte* des stochastischen Prozesses mit der Autokovarianzfunktion γ_k , sie wird durch das Periodogramm $I(\omega)$ nach (4-6) geschätzt. Dieses ist zwar asymptotisch erwartungstreu, aber kein konsistenter Schätzer, da die Varianz von $I(\omega)$ für $T \rightarrow \infty$ gegen $f^2(\omega)$ strebt. Es ist also nicht möglich, durch Verlängerung der Zeitreihe die Varianz des Periodogramms zu reduzieren. Um es trotzdem bei der Zeitreihenanalyse nutzen zu können, wurden andere Verfahren zur Verkleinerung der Varianz entwickelt. Diese beruhen durchwegs auf der Bildung von gleitenden Mittelwerten. Für die optimale Fensterlänge und die Wahl der Gewichte gibt es zahlreiche Vorschläge, die in der Literatur ausführlich behandelt werden.

Da $I(\omega)$ die Fouriertransformierte der Folge (c_k) ist, lassen sich durch die Umkehrformel die Kovarianzen aus dem Periodogramm zurückgewinnen

$$c_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I(\omega) e^{-ik\omega} d\omega \quad (5-10)$$

Für $k = 0$ ergibt (5-10) die Prozeßvarianz

$$c_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I(\omega) d\omega \quad (5-11)$$

die gleich der Fläche unter dem Periodogramm ist. An (5-7) liest man ab, daß die Periodogrammwerte, je nach Stärke des Beitrages der Frequenz ω , um das mittlere Niveau c_0 schwanken. Die Gesamtvarianz wird so auf die einzelnen Frequenzen verteilt (Parsevalsches Theorem).

6 Robuste Schätzverfahren

6.1 Ausreißer in Zeitreihen

Trotz aller Sorgfalt bei der Datenerfassung enthalten Zeitreihen gelegentlich Werte, die so stark von den Nachbarwerten abweichen, daß der Verdacht einer Fehlmessung oder Fehlregistrierung entsteht. Solche Ausreißer sind nach aller Erfahrung unvermeidbar; daher müssen Methoden eingesetzt werden, die sicherstellen, daß die Ergebnisse der Analyse dadurch nicht verfälscht werden. Zwei Ursachen von Ausreißern lassen sich unterscheiden:

- Der beobachtete Prozeß wird kurzzeitig gestört. Die Beobachtungen sind zwar korrekt, aber nicht repräsentativ. Sie widersprechen dem Modell, das nur den durchschnittlichen Verlauf des Prozesses abbilden kann. Solche Beobachtungen werden als *Innovationsausreißer* bezeichnet. Sie beeinflussen im allgemeinen die Analyse nur wenig, da ihre Wirkung durch die Modellgleichungen gedämpft wird und sich hauptsächlich in einer Erhöhung der Varianz nieder schlägt.
- Das richtige Ausgangssignal des Prozesses wird durch eine Fehlfunktion bei der Ablesung oder Registrierung zu einem Ausreißer. Diese sogenannten *additiven Ausreißer* führen zu groben Verfälschungen der Kovarianz- und Parameterschätzungen und zu Problemen bei der Modellidentifikation, wenn konventionelle Methoden eingesetzt werden.

Ausführliche Untersuchungen zum Einfluß von Ausreißern auf die Zeitreihenanalyse findet man u.a. bei (CASPARY/CHEN 1995) und (CHEN 1996).

6.2 Robuste Schätzung des Trends

Wie in Abschnitt 2.1 ausgeführt, wird der deterministische Anteil der zu analysierenden Zeitreihe in der Regel als Funktion der Zeit $f(t; \alpha)$ modelliert, z.B. als Polynom, Abklingfunktion oder periodische Funktion. Erfolgt die Parameterschätzung auf der Grundlage von (2-3), so führen Ausreißer zu Verfälschungen bei der Parameter- und Varianzschätzung. Wirkungsvolle Abhilfe schaffen robuste Schätzer, bei denen die Summe der Quadrate (2-3) durch eine Summe von Funktionen der Residuen

$$\sum_{t=1}^T \varphi(x_t - f(t; \hat{\alpha})) \Rightarrow \min \quad (6-1)$$

ersetzt wird. Eine ausführliche Darstellung des durch (6-1) definierten Schätzprinzips sowie seiner Anwendung im Rahmen der Ausgleichsrechnung findet man z.B. in (BORUTTA 1988) und (CASPARY 1988), während (CHEN 1996) und (SUTOR 1997) speziell die Anwendung bei der Zeitreihenanalyse behandeln. Von den zahlreichen Funktionen, die zur Bildung von (6-1) geeignet und auch untersucht worden sind, soll hier die von (HAMPEL 1968) vorgeschlagene kurz dargestellt werden.

Seien

$$u_t = \frac{x_t - f(t; \hat{\alpha})}{\sigma_x} \quad (6-2)$$

die normierten Modellresiduen. Die Ableitung der Funktion (6-1) führt auf das Gleichungssystem

$$\sum_{t=1}^T \frac{\partial \varphi(u)_t}{\partial \alpha} = \sum_{t=1}^T \psi(u)_t = 0, \quad (6-3)$$

in dem die Funktion $\psi(u)$ den Einfluß der einzelnen Beobachtungen auf das Schätzergebnis steuert. Falls in einem linearen (linearisierten) Modell $x_t + v_t = A\alpha$ ein Vektor α von Parametern geschätzt wird, so geht (6-3) über in $A'\psi(u) = 0$. Für die ψ -Funktion setzt man nach Hampel

$$\psi(u) = \begin{cases} u & \text{für } |u| < k_1 \\ k_1 \operatorname{sgn}(u) & k_1 \leq |u| < k_2 \\ k_1(k_3 - |u|)/(k_3 - k_2) \operatorname{sgn}(u) & k_2 \leq |u| < k_3 \\ 0 & |u| \geq k_3 \end{cases} \quad (6-4)$$

$$k_1 : k_2 : k_3 = 1 : 2 : 4 \text{ und } 1 < k_1 \leq 2$$

Das Gleichungssystem ist iterativ zu lösen. Geeignete numerische Verfahren sind in (BORUTTA 1998) dargestellt. Der Graph der ψ -Funktion zeigt, daß Beobachtungen, deren normierte Residuen außerhalb des Intervalls $[-k_1, k_1]$ liegen, in ihrem Einfluß gedämpft und ab der Grenze $\pm k_3$ gänzlich verworfen werden. Die Festlegung der Konstanten k_i erfolgt unter Berücksichtigung der Qualität der Beobachtungen. Wenn sie im mit (6-4) angegebenen Rahmen bleiben, sind die Schätzergebnisse nicht sensitiv hinsichtlich mäßiger Variationen der k_i .

Sie sind jedoch frei von Verfälschungen, die durch Ausreißer hervorgerufen werden können, sofern nur die Mehrzahl der Beobachtungen mit dem gewählten deterministischen Modell $f(t; \alpha)$ konform ist.

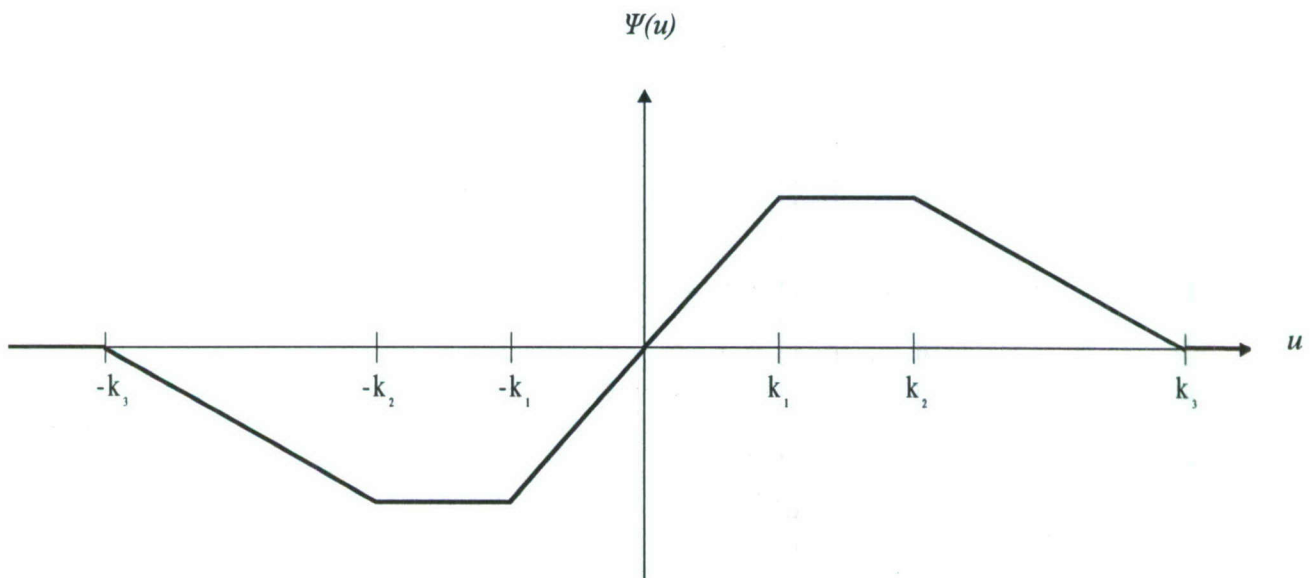


Abbildung 3: ψ -Funktion nach Hampel

6.3 Robuste Kovarianzschätzung

Ein stationärer stochastischer Prozeß ist durch Erwartungswert und Autokovarianzfunktion vollständig beschreibbar. Daher spielt die Schätzung der Autokovarianzen für die Modellbildung im Rahmen der Zeitreihenanalyse eine herausragende Rolle. Additive Ausreißer in den Meßwerten führen im Mittel dazu, daß die Schätzungen für Varianz und Kovarianz nach (5-1) zu groß ausfallen und daß die Korrelationskoeffizienten dem Betrage nach zu klein geschätzt werden. Die strukturelle Abhängigkeit zwischen den Zufallsvariablen wird daher in diesem Fall durch das überhöhte Varianzniveau überdeckt und kann somit bei der Analyse meist nicht zuverlässig modelliert werden.

Diese Problematik hat zu zahlreichen Vorschlägen für die Robustifizierung der Kovarianzschätzung geführt, von denen die meisten, wie (SUTOR 1997) durch umfangreiche Simulationen nachgewiesen hat, nur geringe Wirksamkeit besitzen. Lediglich zwei Ansätze führen bei vertretbarem numerischen Aufwand zu robusten und positiv definiten Schätzungen der Kovarianzfunktion.

Nach einem Vorschlag in (HUBER 1981) führt es zum Ziel, wenn die Zeitreihe (x_t) vor der Anwendung von Gleichung (5-1) gefiltert wird. Dazu wird zunächst ein robustes Mittel \bar{x} nach (6-3) mit der ψ -Funktion (6-4) berechnet. Anschließend wird die gefilterte Zeitreihe

$$y_t = \psi\left(\frac{x_t - \bar{x}}{s}\right) \quad (6-5)$$

gebildet, wobei s ein robuster Schätzer für die Standardabweichung ist, für dessen Berechnung es mehrere Möglichkeiten gibt, siehe z.B. (CASPARY 1988).

Eine andere Vorgehensweise haben (DEVLIN e.a. 1975) erfolgreich entwickelt. Sie beruht auf der Formel

$$r_k = (q_+ - q_-) / (q_+ + q_-) \quad (6-6)$$

zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten für den Beobachtungsabstand k . Zunächst werden aus der Zeitreihe (x_t) , $t = 1, 2, \dots, T$ zwei Folgen gebildet: (x_i) , $i = 1, 2, \dots, T-k$ und (x_j) , $j = k+1, k+2, \dots, T$. Für beide Folgen werden entsprechend dem Ansatz von (HUBER 1981) die robusten Mittelwerte und Standardabweichungen geschätzt mit denen sie gemäß (6-2) normiert werden. Aus den so definierten Folgen (u_i) und (u_j) werden die Quadratsummen

$$\begin{aligned} q_+ &= \sum_{i=1}^{T-k} (u_i + u_j)^2, j = i+k \\ q_- &= \sum_{i=1}^T (u_i - u_j)^2, j = i+k \end{aligned} \quad (6-7)$$

geformt, die in (6-6) eingesetzt, eine robuste Schätzung der Korrelation liefern.

6.4 Robuste Schätzung für ARMA-Modelle

In ARMA-Modellen wirken additive Ausreißer sowohl bei der Schätzung der Modellparameter als auch bei der Identifikation des besten empirischen Modells störend. Eine Robustifizierung der in Abschnitt 3 skizzierten Methoden ist daher dringend anzuraten. Die Vorgehensweise kann direkt aus dem vorstehenden Abschnitt abgeleitet werden.

Zur Schätzung der Parameter von AR-Modellen sind in den Yule-Walker Gleichungen (3-2) lediglich die nach (3-3) berechneten Kovarianzen c_k durch robuste Schätzwerte nach Abschnitt 6.3 zu ersetzen. Ebenso ist in die Gleichungen (3-6) für die Parameter von MA-Modellen eine robuste Version der Kovarianzen c_k einzusetzen, um dem Einfluß grober Fehler entgegenzuwirken. Da die Schätzung der Parameter von ARMA-Modellen ebenfalls auf den Kovarianzen basiert, reicht es in der Regel auch hier, in allen Gleichungen die robusten Kovarianzen zu verwenden.

7 Anwendungsbeispiel

Die in Abbildung 2 dargestellte Zeitreihe zeigt die an einer Dehnungsfuge gemessene relative Verschiebung zwischen zwei Bauteilen eines Wasserkraftwerkes. Zur Ermittlung der gesamten Deformation werden an mehreren kritischen Stellen kontinuierliche Beobachtungen durchgeführt, die zunächst getrennt analysiert werden. Die Ergebnisse werden anschließend zusammengeführt und bilden die Grundlage für die Beurteilung der Sicherheit des Bauwerks.

Die betrachtete Zeitreihe enthält $T = 978$ tägliche Ablesungen, die in den Jahren 1984 bis 1986 durchgeführt wurden. Der graphischen Darstellung entnimmt man, daß die Meßgröße im ersten halben Jahr stark und danach schwach ansteigt, daß dieser allgemeinen Tendenz eventuell eine Schwingung überlagert ist und daß zahlreiche Beobachtungen offensichtlich als Ausreißer zu bewerten sind.

Als Ziele der Analyse dieser Beobachtungsreihe sind zu nennen:

1. Anpassung einer Trendfunktion, die das deterministische Verhalten des Objekts an der Dehnungsfuge modelliert.
2. Ermittlung reversibler Deformationen, die als Folge der sich mit jährlicher Periode ändernden Wasserstände und Temperaturen erwartet werden.
3. Beschreibung der Zufallskomponente durch ein stochastisches Modell mit Schätzung der Prozeßvarianz und der Beobachtungsgenauigkeit.
4. Auf der Basis der Ergebnisse von 1. bis 3. Prognose des zukünftigen Verhaltens des Objekts an der Meßstelle.

Alle Schätzergebnisse sollen auf Signifikanz getestet und so ermittelt werden, daß sie von den Ausreißern in der Zeitreihe unbeeinflusst bleiben.

7.1 Trendbestimmung

Als Modell für den deterministischen Anteil des beobachteten Signals wird ein Polynom 2. Grades gewählt

$$x_t + v_t = a_0 + a_1 t + a_2 t^2, \quad t = 1, 2, \dots, 978. \quad (7-1)$$

Die Schätzung der Polynomkoeffizienten wird wegen der zahlreichen Ausreißer robust durchgeführt. Dazu wird die ψ -Funktion von Hampel nach (6-4) mit $k_1 = 1,8$ eingesetzt. Die Berechnung erfolgt durch iterative Anwendung des Kleinste-Quadrate Algorithmus. Nach (6-3) ist das Gleichungssystem

$$A' \psi(u) = 0, \quad u = (A\hat{a} - x) / s \quad (7-2)$$

zu lösen. Führt man nun eine diagonale Gewichtsmatrix P mit $p_t = \psi(u_t) / u_t$ ein, so kann (7-2) in

$$A' P (A\hat{a} - x) = 0 \quad (7-3)$$

umgeschrieben werden, und man erhält die Normalgleichungen

$$A' P A \hat{a} - A' P x = 0, \quad (7-4)$$

in denen die Gewichte allerdings erst nach Kenntnis der Residuen,

$$v = A\hat{a} - x \quad (7-5)$$

d.h. nach der Lösung von (7-4) berechnet werden können.

Beginnt man zunächst mit $P = I$, so kann eine Iteration der Gewichte begonnen werden, die nach wenigen Zyklen konvergiert. Für die vorliegende Zeitreihe erhält man die Schätzwerte

nach fünf Iterationen

$$\begin{aligned}\hat{a}_0 &= 0,243 \text{ mm}, \hat{a}_1 = 293 * 10^{-6} \text{ mm / Tag} \\ \hat{a}_2 &= -2,100 * 10^{-6} \text{ mm / Tag}^2 \\ s &= (\nu^t P \nu / (T - 3))^{1/2} = 0,196 \text{ mm}\end{aligned}\tag{7-6}$$

Schätzungen mit Polynomen höherer Ordnung führen nicht zur Verringerung der Standardabweichung s und ergeben insignifikante Koeffizienten.

7.2 Deterministische Schwingung

Die Residuen des Trendmodells weisen ausgeprägte Schwingungen auf, deren Frequenzen mit Hilfe des Periodogramms (4-6) identifiziert werden. Um die Details besser sichtbar zu machen, sind in Abbildung 4 die Werte des Periodogramms in $[dB]$ angegeben.

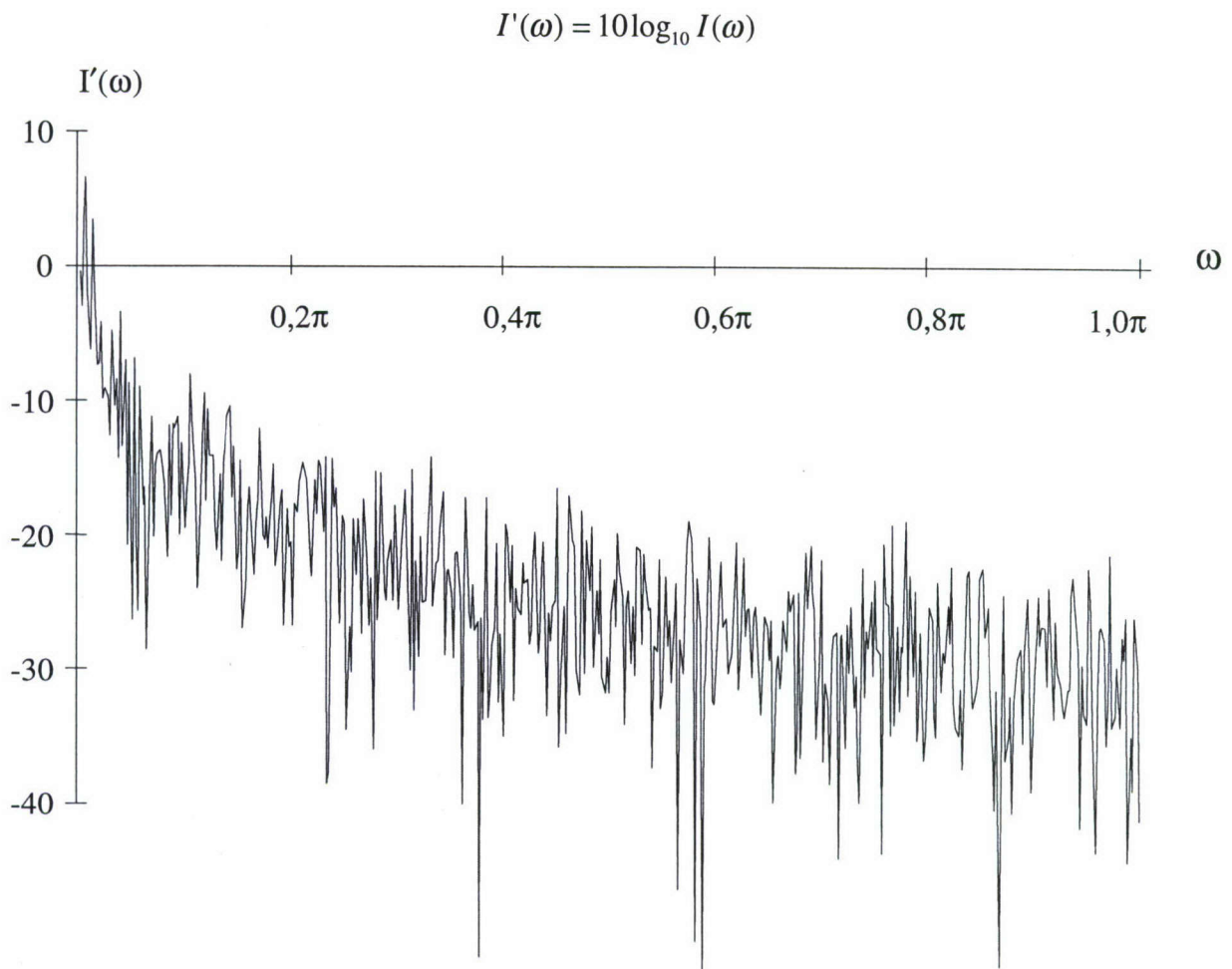


Abbildung 4: Periodogramm der Zeitreihe

Die offensichtlich vorhandenen Schwingungen mit niedriger Frequenz im Bereich unter $0,1\pi$ werden anschließend genauer analysiert. Dazu wird eine dichte Folge von 200 Werten des Periodogramms

$I'(\omega)$ für $0 \leq \omega \leq 0,1\pi$ berechnet. Das in Abbildung 5 dargestellte Ergebnis läßt drei dominante Frequenzen erkennen, nämlich $0,0054\pi$; $0,0085\pi$; $0,0151\pi$.

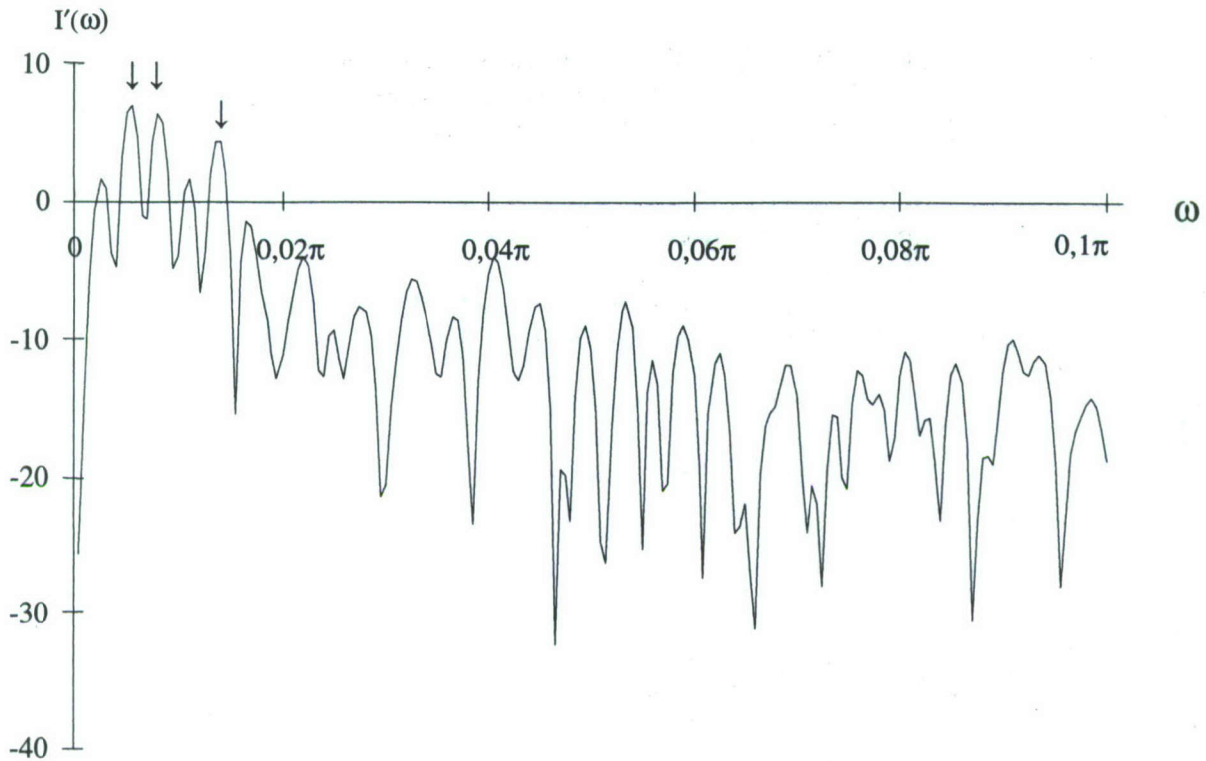


Abbildung 5: Periodogramm

Auf der Basis von (4-1) werden zunächst die Parameter der stärksten Schwingung, d.h. für $\omega = 0,0054\pi$ geschätzt. Mit v_t aus (7-5) lautet das lineare Modell

$$v_t + v'_t = b_1 \cos \omega t + b_2 \sin \omega t \quad (7-7)$$

Wegen der Ausreißer wird ein robustes Verfahren eingesetzt, die Berechnung erfolgt daher wiederum iterativ, völlig analog zur Vorgehensweise bei der Trendschätzung. Die Ergebnisse werden anschließend mit dem F-Test auf Signifikanz geprüft. Die Teststatistik lautet dazu nach (CHEN 1996)

$$\frac{(v' P v - v' P' v') / 2}{v' P' v' / (T - 5)} \sim F(2, T - 5) \quad (7-8)$$

Die Irrtumswahrscheinlichkeit des Tests ist zu 0,01 festgelegt worden.

Im nächsten Schritt wird ein neues Periodogramm und zwar für die Residuen v'_t aus (7-7) berechnet und für die Frequenz mit dem höchsten Gipfel wiederum die harmonische Funktion angepaßt. Auch jetzt erweist sich die Schwingung auf dem Niveau 0,01 als signifikant. Der dritte Durchgang desselben Verfahrens ergibt, daß keine weitere signifikante deterministische Schwingung in den Daten enthalten ist. Das numerische Ergebnis lautet

$$\omega_1 = 0,0054\pi \hat{=} \text{Periode } 1,01 \text{ Jahre}, \hat{A}_1 = 0,144 \text{ mm}, s_1 = 0,15 \text{ mm}$$

$$\omega_2 = 0,0117\pi \hat{=} \text{Periode } 0,47 \text{ Jahre}, \hat{A}_2 = 0,107 \text{ mm}, s_2 = 0,13 \text{ mm}$$

Abschließend wurde eine simultane Schätzung aller sieben Parameter des deterministischen Modells

$$x_t + v_t = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \sum_{i=1}^2 b_{1i} \cos \omega_i t + b_{2i} \sin \omega_i t \quad (7-9)$$

nach dem robusten Verfahren durchgeführt. Die signifikanten Stellen der Schätzwerte haben sich dabei nicht verändert, was für die Zulässigkeit der pragmatischen schrittweisen Schätzung spricht. In Abbildung 2 ist der Verlauf des so ermittelten Trends mit angegeben.

7.3 Anpassung eines ARMA-Modells

Die Residuen v_t nach Abspaltung des deterministischen Anteils (7-9) werden als Realisierung eines stationären stochastischen Prozesses aufgefaßt. Sie sind in Abbildung 6 aufgetragen. Man sieht sehr deutlich die Ausreißer,

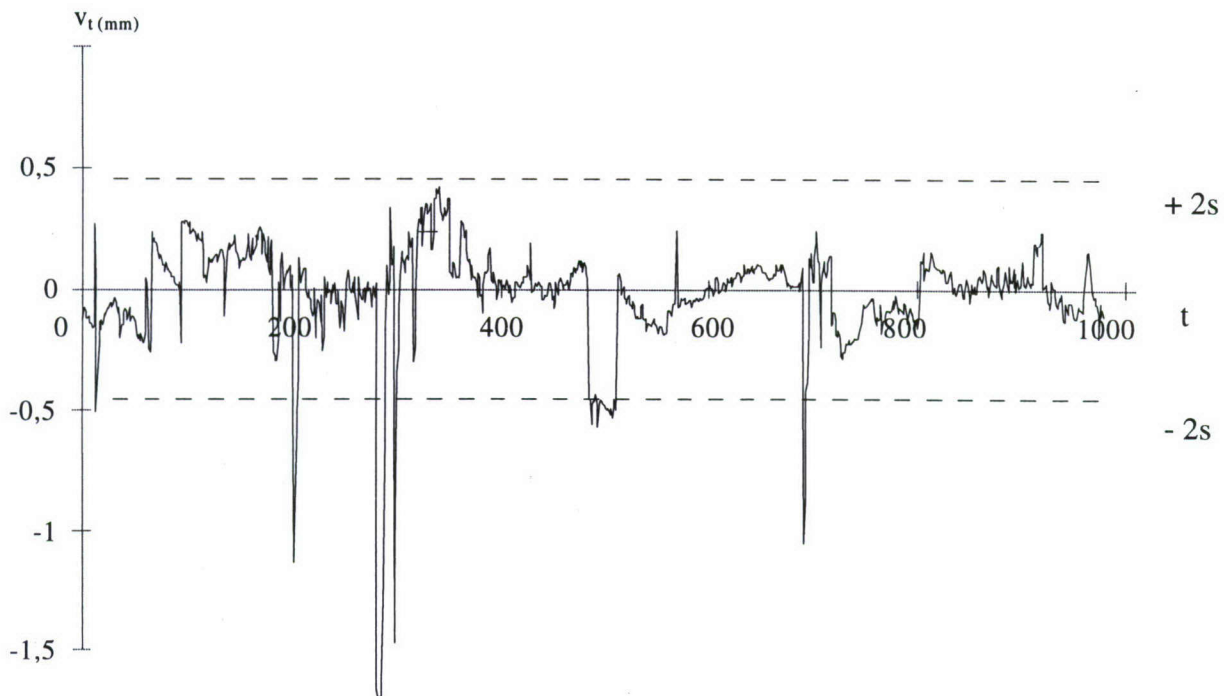


Abbildung 6: Residuen nach der Abspaltung des deterministischen Anteils

gegen die Maßnahmen zu ergreifen sind. Ferner sind für einige fehlende Beobachtungen plausible Werte einzusetzen ehe die Anpassung eines ARMA-Modells erfolgen kann. Als Methode wird dazu eine robuste Version des normalen Kriging eingesetzt. Vor der Berechnung des Variogramms (5-6) werden die Residuen nach (6-5) gefiltert. Dem resultierenden Semivariogramm wird das Gauß-Modell

$$\delta_k = A + \sigma^2 (1 - \exp\{-k^2 / a^2\}) , \quad 1 \leq k \leq T/3 \quad (7-10)$$

mit $\delta_k = 0$ für $k = 0$ angepaßt. Die robuste Schätzung ergibt die Parameter

$$\hat{A} = 0,00127, \quad \hat{a} = 33,1, \quad s = 0,192 \text{ mm} \quad (7-11)$$

Mit dieser empirischen Funktion für das Semivariogramm werden die Kriging-Gewichte berechnet, mit deren Hilfe die Prädiktion der fehlenden und der grob fehlerhaften Werte der Zeitreihe erfolgt. In die Prädiktionsgleichung werden wiederum die mit (6-5) gefilterten Residuen eingesetzt. Das Ergebnis sind die in Abbildung 7 dargestellten bereinigten Residuen v'_t , die nun als stationäre trendfreie Zeitreihe weiter analysiert werden können.

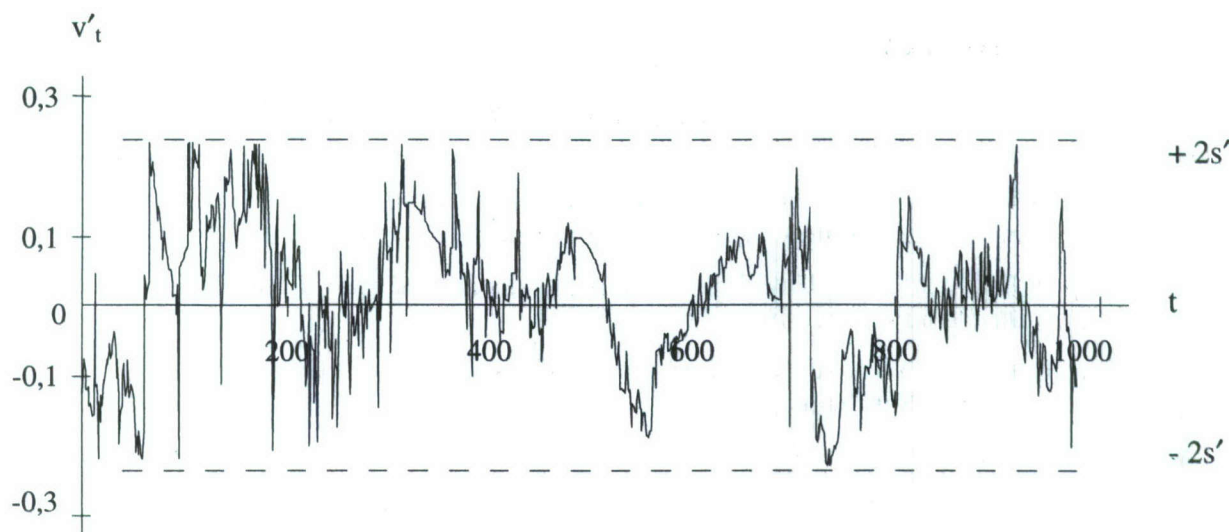


Abbildung 7: Residuen nach dem robusten Kriging

Nach Abschnitt 2.4 kann für diese Zeitreihe die Darstellung

$$v'_t = \eta_t + v_t \quad (7-12)$$

gewählt werden, in der η_t durch ein ARMA-Modell approximierbar ist und v_t als weißes Meßrauschen angenommen wird. Der in 2.4 skizzierten, in (Chen 1996) ausführlich dargelegten, Vorgehensweise folgend, werden die Koeffizienten α und β der ARMA(p,q)-Modelle (2-17) für alle Kombinationen p und q mit $p, q = 0, 1, \dots, 5$ robust geschätzt. Gleichzeitig wird die Gesamtvarianz s'^2 der Zeitreihe (7-12) durch eine Varianzkomponentenschätzung zerlegt, und zwar in einen Teil s^2 , der den ARMA-Prozeß charakterisiert und den Anteil s_ϵ^2 des weiß angenommenen Prozeßrauschens enthält, und einen Teil s_v^2 , der das Meßrauschen repräsentiert. Da sich diese Rechenschritte gegenseitig beeinflussen, mußte die Schätzung iterativ erfolgen.

Das Ergebnis sind sieben Modelle mit signifikanten Parametern, die geeignet erscheinen den Prozeß nachzubilden. Als plausibelstes Modell wird das ausgewählt, das mit der geringsten Anzahl an Parametern, die Gesamtvarianz s'^2 am genauesten reproduziert. Es handelt sich um ein AR(3)-Modell mit den Parametern

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_1 &= 1,036, & \hat{\alpha}_2 &= -0,278, & \hat{\alpha}_3 &= 0,095 \\ s_\epsilon &= 0,048, & s_v &= 0,032, & s &= 0,101 \end{aligned} \quad (7-13)$$

Während die Parameter $\hat{\alpha}_i$ dimensionslos sind besitzen die Standardabweichungen die Dimension Millimeter.

8 Literaturnachweis

- BETHGE, F., MEIER, S. u. SEEGRAEF, C.: *Glättungsfilter im Wavelet- und Fourier-Bereich*. AVN 104, S. 341-348, 1997
- BORUTTA, H.: *Robuste Schätzverfahren für geodätische Anwendungen*. Schriftenreihe Vermessungswesen UniBw München, Heft 33, 1988
- BOX, G. E. P. u. JENKINS, G. M.: *Time Series Analysis, forecasting and control*. Rev. Ed. Holden-Day, San Francisco 1976
- BROCKWELL, P. J. u. DAVIS, R. A.: *Introduction to Time Series and Forecasting*. Springer-Verlag, New York 1996
- CAMPBELL, J., NOTHNAGEL, A. u. SCHUH, H.: VLBI-Messungen für geodynamische Fragestellungen. ZfV 117, S. 214-227, 1992
- CHATFIELD, C.: *The Analysis of Time Series*. 4th Ed. Chapman and Hall, London New York 1989
- CASPARY, W.: *Fehlerverteilungen, Methode der kleinsten Quadrate und robuste Alternativen*. ZfV 113, S. 123-133, 1988
- CASPARY, W., CHEN, G.: *Identifikation stochastischer Prozesse bei Vorhandensein grober Meßfehler*
 - Teil I: AR (p)- und MA (q)-Modell. ZfV 120, S. 479-488, 1995
 - Teil II: ARMA (p, q)-Modell. ZfV 120, S. 556-565, 1995
- CASPARY, W. u. SUTOR, T.: *Robust Estimation in the Frequency Domain*. Proc. 8th FIG Symp. Def. Meas. Hong Kong, S. 259-263, 1996
- CHEN, G.: *Robuste Verfahren zur Analyse linearer stochastischer Prozesse im Zeitbereich*. Schriftenreihe Vermessungswesen UniBw München, Heft 53, 1996
- CHEN, Y.Q. u. CHRZANOWSKI, A.: *Identification of deformation models in space and time domain*. Survey Review 33, S. 518-528, 1996
- DEVLIN, S., GNANADESIKAN, R. u. KETTENRING, J.: *Robust Estimation and Outlier Detection for Correlations*. Biometrika 62, S. 531-545, 1975
- DOLL, H., HEGER, W. KUHLMANN, H. u. SPINDLER U.: *Deformationsanalyse des westlichen Pylons der Norderelbbrücke mit dem Neigungsmeßsystem ROTLEVEL*. AVN 102, S. 133-143, 1995
- ELLMER, W.: *Untersuchung temperaturinduzierter Höhenänderungen eines Großturbinentisches*. Schriftenreihe Vermessungswesen UniBw München, Heft 26, 1987
- FASCHING, M.: *Messung des Dispersionswinkels zur Bestimmung der Refraktion*. AVN 100, S. 51-62, 1993
- HAMMING, R., W.: *Digitale Filter*. VCH-Verlag, Weinheim 1987
- HAMPEL, F. R.: *Contribution to the Theory of Robust Estimation*. PhD-Thesis, Univ. of California, Berkely 1968
- HEISTER, H., HOLLMANN, R. u. LANG, M.: *Multipath-Einfluß bei GPS-Messungen: Auswirkungen und Konsequenzen für praktische Messungen*. AVN 104, S. 166-177, 1997
- HÖPFNER, J.: *Periodische Anteile in der Erdrotation und dem atmosphärischen Drehimpuls und ihre Genauigkeiten*. ZfV 120, S. 8-16, 1995

- HUBER, P.: *Robust Statistics*.
John Wiley and Sons, New York 1981
- KOCH, K.-R. u. SCHMIDT, M.: *Deterministische und stochastische Signale*.
Dümmler, Bonn 1994
- KRONMÜLLER, H.: *Digitale Signalverarbeitung*.
Springer-Verlag, Berlin 1991
- KUHLMANN, H.: *Ein Beitrag zur Überwachung von Brückenbauwerken mit kontinuierlich registrierenden Messungen*.
Wiss. Arb. Univ. Hannover, Nr. 218, 1996
- LEVENSHAGEN, J.: *Identifikation synthetischer dynamischer Übertragungsmodelle und ihre Störungen im Zeitbereich*.
Mitt. Geod., Inst. Bonn, Nr. 83, 1998
- LÖFFLER, F.: *Kontinuierliche Höhenmessungen für die Detektoren des HERA-Beschleunigers beim Deutschen Elektronen Synchrotron DESY*.
AVN 99, S. 405-416, 1992
- MONTAG, H.: *Zur Definition und Überwachung der Parameter des Internationalen Terrestrischen Referenzsystems ITRF mit besonderer Berücksichtigung der Variation des Geozentrums*.
ZfV 123, S. 215-222, 1998
- OLAFSSON, S. u. SIGBJÖRNSSON, R.: *Application of ARMA Models to Estimate Earthquake Ground-motion and Structural Response*.
Earthqu. Eng. a. Struct. Dyn. 24, S. 951-966, 1995
- RABAH, M.: *Developing a real-time model to reduce the geometric delay residuals in double-difference GPS observations over long baselines*.
AVN 106, S. 128-133, 1999
- RÜHRNÖSSL, H., BRUNNER, F. u. ROTHACHER, M.: *Modellierung der troposphärischen Korrektur für Deformationsmessungen mit GPS im alpinen Raum*.
AVN 105, S. 14-20, 1998
- SCHLITGEN, R. u. STREITBERG, B. H. J.: *Zeitreihenanalyse*. 3. Aufl.
Oldenbourg Verlag, München 1989
- SCHMIDT, M. u. SCHUH, H.: *Wavelet-Analyse der mit VLBI beobachteten Nutationsreihen*.
ZfV 124, S. 24-30, 1999
- STAIGER, R.: *Zur Überprüfung moderner Vermessungsinstrumente*.
AVN 105, S. 365-372, 1998
- SUTOR, T.: *Robuste Verfahren zur Analyse linearer stochastischer Prozesse im Spektralbereich*.
Schriftenreihe Vermessungswesen UniBw München, Heft 56, 1997
- WANNINGER, L.: *Der Einfluß ionosphärischer Störungen auf präzise GPS-Messungen in Mitteleuropa*.
ZfV 118, S. 25-36, 1993
- WENZEL, H.-G.: *Zum Stand der Erdzeitenanalyse*.
ZfV 121, S. 242-255, 1996
- ZENKOV, Z.: *Zur Anwendung der Spektralanalyse bei der Untersuchung von Rutschungen*.
ZfV 116, S. 171-176, 1991
- ZIMMERMANN, T.: *Ein neuartiges Verfahren zur elektrooptischen Entfernungsmessung mit Brandpreizsignalformen und optimalem Signalverarbeitungsalgorithmus nach dem Maximum-Likelihood-Prinzip*.
AVN 98, S. 205-212, 1991

ZISCHINSKY, R., HENRIKSEN, J. u. LACHAPELLE, G.: *An Investgation of GPS Post-Mission Single Point Position Errors.*
AVN 104, S. 52-60, 1997

GEODÄTISCHE ASTRONOMIE AUSSICHTEN AN DER SCHWELLE ZUM 21. JAHRHUNDERT

Univ-Prof. Dr.-Ing. Albert Schödlbauer
Universität der Bundeswehr München
Institut für Geodäsie
85577 Neubiberg

Zusammenfassung

Aufgrund ihrer wesentlich größeren Genauigkeit und ihrer Nutzerfreundlichkeit hat die Satellitennavigation die Astronavigation fast vollständig verdrängt. In diesem Trend hat auch die Geodätische Astronomie einige ihrer traditionellen Aufgaben eingebüßt. Die Kernaufgabe der Geodätischen Astronomie, nämlich die direkte Bestimmung der Lotrichtungen in einem erdfesten Bezugssystem, kann jedoch von keinem anderen Messverfahren geleistet werden.

Mit neuen Ansätzen zur Automation kann die Geodätische Astronomie die ihr verbliebene Aufgabe künftig wirtschaftlicher als bisher erledigen. Sie kann so einen eigenständigen Beitrag zur Geoidbestimmung leisten und in dieser Funktion das Instrumentarium der Satellitengeodäsie sogar wirkungsvoll ergänzen. In dem vorliegenden Beitrag wird über die Entwicklungen in Theorie und Praxis berichtet, die die Erwartung begründen, dass die Geodätische Astronomie in der Geodäsie künftig wieder eine größere Rolle spielen wird.

GEODETIC ASTRONOMY PROSPECTS AT THE THRESHOLD OF THE 21ST CENTURY

Abstract

Due to its high standard of accuracy and ease of use, Satellite Navigation has almost completely supplanted Positional Astronomy. In the course of this trend Geodetic Astronomy has lost considerable ground. However its main task, the direct determination of the directions of the plumb lines in an earth-fixed reference system, cannot be performed by any other method. Thus, Geodetic Astronomy is still an inalienable geodetic tool.

New approaches in automation allow Geodetic Astronomy to be employed more effectively now than in the past. It can provide an independent contribution to the determination of the geoid and supplements the methods of satellite geodesy in this respect. The paper describes recent theoretical and instrumental developments aimed at automating procedures for determining the direction of the plumb-line and of precise local geoids.

1 Neubewertung der Aufgabenstellung

1.1 Einführung

Mit der Aufnahme von Satellitenverfahren, insbesondere des Global Positioning System (GPS), in das Arsenal geodätischer Messsysteme hat sich in der Geodäsie ein geradezu revolutionärer Wandel der Methodik der Richtungs- und Positionsbestimmung vollzogen. Ähnlich tiefgreifend war der Einfluss der neuen Verfahren auf die Navigation. Im Zuge dieser Entwicklung wurden die Methoden der Geodätischen Astronomie (GA) zur absoluten Bestimmung von Lotrichtungen und Positionen kaum noch beachtet, gelegentlich wurde die Disziplin sogar schon für »tot« erklärt. Wenn auch solche »Meldungen« – um die Worte von Mark Twain in einem Telegramm an Associated Press aufzugreifen – »eine Über-treibung« waren, die »Lebenszeichen« in den geodätischen Fachzeitschriften waren in der Tat nur noch sehr schwach. Der Schwerpunkt der geodätischen Forschung und Entwicklung hatte sich hin zu den neuen Technologien bewegt.

Noch bis in Mitte dieses Jahrhunderts war die (GA) das einzige Verfahren, mit dem in einem globalen Bezugssystem absolute Positionen bestimmt werden konnten. Allerdings hat es sich bei den ermittelten Positionen immer nur um Näherungsorte gehandelt. Denn die mit Hilfe der GA durch Richtungsanschlüsse an Fixsterne und an die Sonne bestimmten geographischen Längen (λ) und Breiten (ϕ) von Beobachtungsstandorten beschreiben »nur« die Lotrichtungen in diesen Standorten, nicht aber deren räumliche Positionen. Die Gewinnung von Positionen auf einem Erdellipsoid (B, L) aus den Lotrichtungen (ϕ, λ) setzt die Kenntnis der Lotabweichungen ($\xi = \phi - B, \eta = \lambda - L$) voraus. Globale Kenntnisse über die Lotabweichungen als Funktion der Lotrichtungen ($\xi = \xi\{B, L\}, \eta = \eta\{B, L\}$ oder $\xi = \xi\{\phi, \lambda\}, \eta = \eta\{\phi, \lambda\}$) waren aber seinerzeit nicht vorhanden. Man musste sich daher bei der Modellierung dieser Funktionen mit sehr groben Modellen der Realität begnügen, z.B. mit der Hypothese, dass die Lotrichtungen mit den Normalen eines Bezugsellipsoids übereinstimmen ($\phi = B, \lambda = L$). Die Abweichungen von dieser Annahme können aber viele Bogensekunden erreichen. Entsprechend muss man bei der Gleichsetzung von Lotrichtung und Ellipsoidnormale mit Lagefehlern von mehreren hundert Metern rechnen (Lageabweichung = unbekannte Lotabweichung mal Erdradius). Da die Satellitenverfahren der Geodäsie und Navigation nicht mit derartigen strukturellen Mängeln behaftet und der GA insoweit grundsätzlich überlegen sind – sie erfassen im übrigen nicht nur zwei, sondern drei Dimensionen des Raumes (Geozentrische cartesische Koordinaten X, Y, Z oder B, L und die Höhe h über einem vereinbarten Ellipsoid) –, hat dieses Anwendungsgebiet der GA zweifellos an Bedeutung verloren, zumindest als primäres Werkzeug der Navigation. Als Back-up-System zu anderen Navigationssystemen wird die Astronavigation aber nach wie vor verwendet. Beispielsweise wird sie trotz der Allgegenwart von GPS-Empfängern im hochtechnisierten US-amerikanischen Verteidigungssystem tagtäglich auf Schiffen der US Navy eingesetzt. Das Sicherheitskonzept der Navy erfordert zwei voneinander unabhängige Mittel der Positionsbestimmung. In diesem Konzept spielt die Astronavigation die Rolle eines unabhängigen, absoluten, weltweit anwendbaren und autonomen Rückversicherungssystems zum GPS (KAPLAN, 1995).

Auch im Bereich der rein geodätischen Anwendungen – der GA im engeren Sinn – ist auf Grund der vielfältigen Möglichkeiten der Satellitengeodäsie eine Reihe von Anwendungsgebieten weggefallen. Paradoxerweise hat aber gerade die Satellitengeodäsie der GA zu einer Renaissance verholfen. Die moderne Geodäsie benötigt ein hochgenaues Geoid als wesentlichen Bestandteil eines globalen geodätischen Bezugssystems. Einer der Gründe für diesen Bedarf sind die Verfahren der Satellitengeodäsie, die heute das Vermessungswesen beherrschen. Diese Verfahren liefern dreidimensionale Positionsangaben und ihre Produkte decken weite Bereiche der klassischen zweidimensionalen Punktbestimmung ab. Was aber die mit Satellitenverfahren bestimmbaren »Höhen« angeht, so genügen diese den Anforderungen der Nutzer nicht. Denn die Satellitenverfahren liefern »ellipsoidische Höhen«, die meisten Abnehmer des Produkts »Höhe« benötigen aber »Höhen über dem Geoid«. Letztere lassen sich nur dann aus Satellitenmessungen ableiten, wenn die ellipsoidischen Höhen durch Vorgabe eines Geoids in Höhen über dem Geoid umgesetzt werden können. Wenn der hohe Genauigkeitsstandard des GPS auf die gesuchten Höhen übertragen werden soll, ist es notwendig, ein »cm-Geoid« bereitzustellen. Dazu kann die GA einen wesentlichen Beitrag leisten. Die GA ist nämlich das einzige Messverfahren, mit dem absolute

Lotrichtungen direkt bestimmt werden können. Die Geodäsie wäre schlecht beraten, wenn sie eine heute leichter als früher zugängliche Observable nicht weiterhin nutzen würde (BRETTERBAUER, 1997). Man darf daher die GA keineswegs als konkurrierendes Verfahren zu Satellitengeodäsie sehen, sondern als eine wertvolle, um nicht zu sagen unentbehrliche Ergänzung.

Es gab in der Vergangenheit noch einen weiteren wichtigen Grund, warum die Verfahren der GA in Konkurrenz zu den Satellitenverfahren an Attraktivität eingebüßt hatten: Sie waren sehr zeitaufwendig und zunächst kaum automatisiert. Das gilt insbesondere für die klassischen Verfahren, bei denen unter gleichzeitiger Erfassung der Beobachtungszeitpunkte die Durchgänge ausgewählter Sterne durch den Meridian, den Ersten Vertikal oder durch einen Almukantarat bestimmt wurden. Die spezifischen Beobachtungsprobleme, die mit der Bewegung, der unterschiedlichen Helligkeit der Ziele sowie mit der Zeiterfassung und Zeithaltung zusammenhingen, setzten im übrigen Beobachtungsspezialisten voraus, die schließlich immer seltener zur Verfügung standen.

Die Einschränkungen, die den Aufwand der Verfahren betreffen, sind mittlerweile entfallen, zumindest im Prinzip. Dazu haben die Entwicklung von photographischen und CCD-Messkammern sowie von automatisierten Zeiterfassungsgeräten ebenso beigetragen wie die heute fast unbegrenzten Möglichkeiten der Rechentechnik. Durch den Einsatz dieser Technologien können die Messgrößen weitgehend automatisch erfasst werden. Die Bestimmung einer Lotrichtung mit den modernen Verfahren der GA erfordert daher im Prinzip keinen größeren Zeitaufwand als die Bestimmung einer Position mit Hilfe von Satelliten. Allerdings befinden sich die meisten Entwicklungen noch im Stadium von Prototypen und es noch großer Anstrengungen der Industrie und der astrogeodätischen Forschung bedürfen, den technologischen Hochstand zu erreichen, den die Satellitengeodäsie heute einnimmt.

1.2 Überblick

Wie bereits dargelegt, hat die GA als Werkzeug der »Astronomischen Geodäsie« wie viele andere Bereiche der Geodäsie mit der Entwicklung der Satellitengeodäsie einen tiefgreifenden Funktionswandel erfahren. Wie sehr sich die Gewichte in wenigen Jahren verschoben haben, seit geodätisch nutzbare Satelliten Einzug in die Erdmessung, Landesvermessung, Ingenieurvermessung und in die Navigation gehalten haben, lässt der Kanon »einiger besonders wichtiger geodätischer Anwendungen der astronomischen Orts- und Azimutbestimmung« erkennen, den RAMSAYER (1970, 2-3) vor gerade erst 30 Jahren aufgestellt hat, und der in etwas eingeschränkter Weise von anderen Autoren auch noch später bestätigt wurde (ROBBINS, 1977; SIGL, 1991). Der von Ramsayer angegebene Aufgabenkatalog der GA lautete (in verkürzter Darstellung):

- a) Lagerung von Dreiecksnetzen auf Referenzellipsoiden
- b) Verbesserung der Richtungsübertragung in Großraumnetzen
- c) Bestimmung der Dimensionen des Erdellipsoids
- d) Bestimmung eines bestanschließenden Ellipsoid
- e) Bestimmung von Lotabweichungen zur Ermittlung von Teilen des Geoids
- f) Bestimmung von Lotabweichungen für dreidimensionale Triangulationen
- g) Bestimmung der Pol- und Rotationsschwankungen der Erde
- h) Passpunktbestimmung für kleinmaßstäbliche Vermessungen
- i) Orts- Zeit- und Azimutbestimmungen auf Expeditionen
- j) Einmessung der Richtungen zu geodätischen Satelliten.

Der Vollständigkeit halber soll die Aufzählung noch um die in dieser Liste nicht erwähnten Aufgaben der

- k) Astronavigation
- l) Kalibrierung von nordsuchenden Kreisel- und Trägheitsnavigationsanlagen.

ergänzt werden. Abgesehen vom verwendeten Instrumentarium sind die Positionen i und k weitgehend identisch. Inhaltlich ergänzt wurde die Liste lediglich um die von Ramsayer nicht erwähnte Position l, die auch schon zum Zeitpunkt der seinerzeitigen Bestandsaufnahme eine Rolle gespielt hat.

Ganz allgemein lässt sich zu den hier aufgezählten Einsatzgebieten der GA aus heutiger Sicht sagen, dass die meisten ihre Bedeutung verloren haben, weil die betreffenden Aufgaben entweder in der

beschriebenen Form nicht mehr anfallen (Buchstaben a, b, c, d, f,) oder durch andere Verfahren, insbesondere der Satellitengeodäsie, genauer und wirtschaftlicher erledigt werden können (Buchstaben g, h, i). Auch in den nach diesen Abstrichen noch verbleibenden Einsatzgebieten (Buchstaben e, j, k, l) gibt es konkurrierende Verfahren, die dazu zwingen, den Bedarf an geodätisch-astronomischen Produkten und Dienstleistungen zu überprüfen und den Stellenwert der GA neu zu definieren.

Das Ergebnis dieser Überprüfung ist in den folgenden Abschnitten 1.3 bis 1.5 zusammengefasst. Mit Sicht auf die notwendige Neubewertung ist die Aufzählung dabei gegliedert in

- ▶ nicht mehr existierende (obsolete) Einsatzgebiete der GA (Buchstaben a, b, c, d, f; \Leftrightarrow 1.3)
- ▶ Einsatzgebiete, in denen die GA durch genauere und wirtschaftlichere Verfahren verdrängt wurde (Buchstaben g, h, i, k; \Leftrightarrow 1.4) und
- ▶ Einsatzgebiete, in denen die GA nach wie vor von Bedeutung ist, mit der Übernahme von Satellitenverfahren in das Arsenal geodätischer Messverfahren partiell sogar an Wichtigkeit zugenommen hat (Buchstaben e, j, l; \Leftrightarrow 1.5).

1.3 Obsolete Aufgabenstellungen

Wegen ihrer großen Bedeutung in der Vergangenheit, insbesondere aber auch weil die Kenntnis der seinerzeit eingesetzten Verfahren zur Beurteilung der Güte der vorhandenen und nach wie vor genutzten Festpunktfelder der Landesvermessung unerlässlich ist, sollen auch die in diesen Abschnitt fallenden Aufgaben kurz beschrieben und kommentiert werden, bevor das Augenmerk den gegenwärtig wichtigen Einsatzgebieten der GA gewidmet wird.

Zu a) Lagerung von Dreiecksnetzen auf Bezugsellipsoiden

Mit dem Verfahren der Triangulation, dem klassischen Verfahren zur Einrichtung eines geodätischen Lagefestpunktfeldes, konnten nur Form und Größe des Punktfeldes, nicht aber dessen absolute Lage und Ausrichtung (Lagerung) auf einem Bezugsellipsoid bestimmt werden. Die erforderliche Lagerung wurde im einfachsten Fall dadurch erreicht, dass auf einem Zentralpunkt P_0 des Dreiecksnetzes in einem ersten Schritt dessen *Geographische Breite* ϕ_0 und die *Geographische Länge* λ_0 sowie mit Sicht auf einen benachbarten Netzpunkt Q_0 ein *Azimet* a_0 astronomisch festgestellt und darüber hinaus die *Höhe des Zentralpunktes* H_0 über dem Geoid (über einem Meerespiegel) nivellistisch ermittelt wurde. In einem zweiten Schritt wurde sodann ein vereinbartes Bezugsellipsoid so an den Zentralpunkt angelegt, dass in diesem Punkt die Richtung der Ellipsoidnormalen \mathbf{n} und der Schwerkraft \mathbf{g} übereinstimmte und darüber hinaus die kleine Achse des Bezugsellipsoids parallel zur Rotationsachse der Erde zu liegen kam. Des weiteren wurde das Ellipsoid entlang von \mathbf{n} so lange parallel zu sich selbst verschoben, bis sein Abstand h_0 von P_0 mit dessen Höhe H_0 übereinstimmte. Die Zielsetzung des zweiten Schrittes wurde durch die Gleichsetzung der astronomisch bzw. nivellistisch bestimmten Größen $\phi_0, \lambda_0, a_0, H_0$ mit den entsprechenden ellipsoidischen B_0, L_0, A_0, h_0 erreicht:

$$B_0 := \phi_0; \quad L_0 := \lambda_0; \quad A_0 := a_0; \quad h_0 := H_0$$

$$(\xi_0 = \phi_0 - B_0 = 0; \quad \eta_0 = \lambda_0 - L_0 = 0; \quad \epsilon_0 = a_0 - A_0 = 0; \quad N_0 = H_0 - h_0 = 0);$$

Als Beispiel für eine derartige Lagerung eines Dreiecksnetzes mag das *Deutsche Hauptdreiecksnetz* (DHDN) dienen, das die geodätische Grundlage für das amtliche Vermessungswesen in Deutschland bildet. Als Bezugsellipsoid wurde das Bessel-Ellipsoid zugrunde gelegt. Der Nullpunkt P_0 des DHDN ist der Punkt Rauenberg (bei Berlin), als Anschlusspunkt für die Azimutmessung wurde Berlin-Marienkirche gewählt (TORGE, 1980, 214; SCHMIDT, 1986). Das so bestimmte geodätische Datum führt (aufgrund einer Missdeutung des Unterscheidungsmerkmals »Potsdam« in dem von der Wehrmacht benutzten »*Deutschen Heeresgitter*« durch das US Army Map Service) die Bezeichnung »*Potsdam-Datum*« (SCHMIDT, 1986). Ähnlich ist man bei der Einrichtung des »Geodätischen Datums 1903« in der Schweiz verfahren (SCHNEIDER/GUBLER/WIGET, 1996, 13).

Bei der Lagerung eines Dreiecksnetzes in der geschilderten Weise erzwingt man zwar bestmögliche Anpassung im Zentralpunkt und in dessen Nachbarschaft, mit zunehmenden Abstand vom Zentralpunkt können aber die Lotabweichungen unerwünscht große Beträge erreichen. Man begegnete in später

angelegten Netzen diesem mit der willkürlichen Punktwahl zusammenhängenden Problem, indem zur Lagerung nicht nur ein Punkt P_0 , sondern mehrere, über das ganze Festpunktfeld hinweg verteilte »Laplace-Punkte« und »Laplace-Azimute« herangezogen wurden, auf denen ϕ_{0i} , λ_{0i} und a_{0i} gemessen und die entsprechenden ellipsoidischen Richtungswinkel B_{0i} , L_{0i} und A_{0i} berechnet wurden. Die dadurch ausgelöste Überbestimmung wurde durch die *Minimierung der Lotabweichungen*, etwa durch

$$\sum \xi_{0i}^2 + \sum \eta_{0i}^2 = \text{Minimum}$$

erreicht, wobei gleichzeitig die *LAPLACE-Bedingung* $\epsilon_{0i} = \eta_{0i} \cdot \tan B_{0i}$ beachtet wurde.¹⁾

Als Beispiele für diese Vorgehensweise mag das *Zentraleuropäische Dreiecksnetz (ZEN)* dienen (WOLF, 1949/1; SCHMIDT, 1995, 43). Dieser über das DHDN hinausgehende, aus Dreiecksketten aufgebaute Netzverband wurde auf dem Internationalen Ellipsoid berechnet. Er stützt sich auf 106 *Laplace-* und 77 *Lotabweichungspunkte*²⁾ (WOLF, 1949/1, 23; KNEIBL, 1953, 38) und führt die Datumsbezeichnung *ED50* (= *Europäisches Datum 1950*).

Die ab 1954 betriebene Weiterentwicklung des ZEN in das ganz Europa flächenhaft abdeckende *Réseau Européen des Triangulations (RETrig)*, die zunächst mit konventionellen Verfahren (Winkel- und Streckenmessungen), später auch unter Einbeziehung von Satellitendaten erfolgte und mit den Datumsbezeichnungen *ED79* und *ED87* verbunden ist, hat für die Praxis keinen Nutzen mehr gebracht und wurde 1987 zugunsten des GPS-gestützten *European Reference Frame (EUREF)* eingestellt.

Geodätische Grundlagentetze werden heute nicht mehr trigonometrisch, sondern ausschließlich mit Hilfe von Satellitenverfahren angelegt, die insoweit keine Unterstützung durch die Verfahren der GA benötigen (SEEBER, 1993, 198-205). Als Beispiele für satellitengestützte geodätische Grundlagentetze mögen dienen:

- ▶ mit kontinentaler Ausdehnung: das *African Doppler Survey Project - ADOS* (IUUG/IAG, 1987), das *Europäische Referenzsystem - EUREF* (SEEGER/ALTINER/ENGELHARDT/Franke/HABRICH/SCHLÜTER 1998) und das *Sistema di Referencia del America del Sur - SIRGAS* (FORTES/HOYER/SUBIZA/DREWES, 1995), und

¹⁾ Die Beachtung der Laplace-Bedingung in einem Punkt und in einer von ihm ausgehenden Richtung in einem trigonometrischen Netzverband bewirkt die Parallelität der Äquatorebene des Bezugsellipsoids mit der Ebene des Himmelsäquators sowie die Parallelität der Nullrichtungen der Längenzählung. Eine wesentliche, a.a.O. nicht erwähnte zusätzliche Voraussetzung ist dabei freilich, dass die Größen λ und a sowie die zur Richtungsübertragung im Netzverband gemessenen Horizontalwinkel die physische Realität exakt beschreiben, d.h. fehlerfrei bestimmt wurden. In der Praxis kann man davon nicht ausgehen, und zwar auch dann nicht, wenn alle Beobachtungen einer Ausgleichung (z.B. nach der Methode der kleinsten Quadrate) unterzogen werden. Denn durch die Ausgleichung können die Auswirkungen der Messfehler zwar minimiert, nicht aber beseitigt werden. Die Folge der durch Messfehler und das Ausgleichungsverfahren bewirkten verzerrten Darstellung der physischen Realität sind Abweichungen vom vorausgesetzten Idealfall der Parallelität. Um die auf ein Bezugsellipsoid bezogenen Punktkoordinaten in ein am Himmelsäquator ausgerichtetes Bezugssystem zu überzuführen, ist daher nicht nur eine Verschiebung (in den drei Koordinatenkomponenten), sondern i.d.R. auch eine kleine Drehung (um drei zueinander nicht parallele Achsen) erforderlich (SEEBER, 1993, 23). Wegen der den klassischen Triangulationsnetzen der Landesvermessung anhaftenden Verzerrungen muss man innerhalb eines Netzverbandes sogar mit Variationen der Lage und Ausrichtung des Bezugsellipsoids rechnen (KOVALEVSKY/MUELLER/KOLACZEK, 1989, 149; SCHÖDLBAUER, 1990/1, 77). Dieses Phänomen tritt bei Vergleichen alter Bezugsellipsoide mit einem geozentrisch gelagerten globalen Ellipsoid in Erscheinung, auf dem die betreffenden Festpunkte aufgrund der modernen (genaueren) Verfahren der Satellitengeodäsie weitgehend unverzerrt abgebildet sind. Es ist hinsichtlich seiner globalen und regionalen Komponenten für die meisten Bezugsellipsoide mit Hilfe von Isolinien in Karten dokumentiert, z.B. der Übergang WGS 84 minus ED 50 für den Bereich von Westeuropa in (DMA, 1987, 15-11 bis 15-13).

²⁾ Insgesamt wurde das ZEN wie folgt astronomisch gestützt:

106 *Laplace-Punkte*:

99 Stationen mit ϕ, λ, a
7 Stationen mit λ, a

77 *Lotabweichungspunkte*:

20 Stationen mit ϕ, λ
43 Stationen mit ϕ, a
11 Stationen mit ϕ
3 Stationen mit a

Das sind insgesamt 451 astronomisch bestimmte Größen!

- in der Größenordnung eines Landes: das *Deutsche Referenzsystem – DREF* (LINDSTROT, 1999) und das 1992 neu bestimmte *geodätische Festpunktfeld von Ruanda* (KRACK, 1993; SCHÖDLBAUER, 1994).

Die Liste ließe sich beliebig erweitern, da die meisten Staaten ihre Grundlagennetze mit dem Global Positioning System erneuert haben und erneuern.

Zu b) Verbesserung der Richtungsübertragung in Großraumnetzen

Das unter Buchstabe a geschilderte Prinzip, zur Stabilisierung der Orientierung eines Landesdreiecksnetzes »Laplace-Azimute« zu messen, kann auf jedes beliebige andere Großraumnetz übertragen werden. Auch diese Aufgabe fällt aufgrund der Möglichkeiten der Satellitengeodäsie heute nicht mehr an.

Zu c) Bestimmung der Dimensionen des Erdellipsoids

Nach dem bereits von Eratosthenes (276-194 v. Chr.) angewandten Prinzip zur Bestimmung der Größe der Erde (damals unter der Hypothese, dass die Erde eine Kugel ist) lässt sich aus einem astronomisch festgestellten Breitenunterschied ($\Delta\phi$) zwischen zwei auf dem gleichen Meridian liegenden Punkten und dem korrespondierenden, durch Streckenmessung gewonnenen Bogenabstand (ΔG) der beiden Punkte der Radius der Kugel bestimmen: $R = \Delta G / \Delta\phi$; (KNEIBL, 1958, 9; BIALAS, 1972, 1).

Bei einem Rotationsellipsoid verändert sich der Meridiankrümmungshalbmesser in Abhängigkeit von der Geographischen Breite. Misst man also in den mittleren Breiten ϕ_i Meridianbogenabschnitte ΔG_i und zugehörige Breitenunterschiede $\Delta\phi_i$ stehen so mit

$$M_i = \frac{\Delta G_i}{\Delta\phi_i} = \frac{c}{(1 + e^2 \cdot \cos^2\phi_i)^{3/2}}; \quad i = 1 \dots n; \quad (1.1)$$

n Gleichungen zur Bestimmung der beiden unbekannten Ellipsoidparameter c = Polkrümmungshalbmesser und e = Zweite numerische Exzentrizität zur Verfügung. Aus c und e lassen sich dann beliebige andere Bestimmungsstücke des Ellipsoids ableiten (SCHÖDLBAUER, 1981, 1). Bei den ersten nach diesem Verfahren durchgeführten Gradbogenmessungen im frühen 18. Jahrhundert (PERRIER, 1949; BIALAS, 1972) wurden die Ellipsoidparameter zunächst aus nur zwei Bogenabschnitten abgeleitet. Da keine Informationen über Lotabweichungen zur Verfügung standen³⁾, war man gezwungen, Lotrichtungen und Ellipsoidnormale gleichzusetzen, was notwendigerweise zu Verfälschungen führte. Spätere Ellipsoidbestimmungen konnten sich auf eine zunehmende Zahl von gemessenen Bogenelementen stützen. Mit dem Beginn des 19. Jahrhunderts begann man in großem Stil Pendelmessungen durchzuführen, aus denen auf der Grundlage des *Theorems von Clairaut* (HEISKANEN/MORITZ, 1967, 69/75/76; PICK/PÍCHA/VYSKOČIL, 1973, 60; TORGE, 1989, 37) zusätzliche Informationen zur Erdabplattung gewonnen werden konnten (STRASSER, 1957).

Die modernen geodätischen Bezugssystemen zugrunde liegenden Ellipsoid-Dimensionen sind heute ausschließlich aus Satellitenbeobachtungen abgeleitet (MORITZ, 1980).

Zu d) Bestimmung eines bestanschließenden Ellipsoids

Die Lösung der hier formulierten Aufgabenstellung ist bereits durch den unter Buchstabe b dargelegten Lösungsansatz abgedeckt. Der einzige Unterschied besteht darin, dass bei der Ausgleichung des Dreiecksnetzes und bei der Koordinatenberechnung auf dem Bezugsellipsoid unter Beachtung von

$$\sum \xi_{0i}^2 + \sum \eta_{0i}^2 = \text{Minimum}$$

als zusätzliche Unbekannte noch die Ellipsoidparameter (z.B. die große Halbachse a und die Abplattung f) bestimmt werden

³⁾ Der erste diesbezügliche, von PIERRE BOUGUER (1698-1758) in Rahmen einer Gradmessungsexpedition nach Peru unternommene Versuch, die durch den 6310 m hohen Chimborazo bewirkte Lotabweichung zu bestimmen (↔ Bezugstext zu Fußnote 7 in 2.4.4), verlief aufgrund widriger Messbedingungen wenig erfolgreich (MASKELYNE, 1775, 495).

1.4 Substitution der Verfahren der Geodätischen Astronomie durch Satellitenverfahren und durch das Verfahren der Langbasis-Interferometrie

Zu g) Bestimmung der Pol- und Rotationsschwankungen der Erde

Die früher durch kontinuierliche Sternbeobachtungen von ausgewählten astronomischen Stationen wahrgenommene Aufgabe, laufend die (geringfügig) variablen *Erdrotationsparameter* »Polkoordinaten« und »Weltzeit minus Atomzeit« (*Tageslänge*, *Winkelgeschwindigkeit der Erde*) zu bestimmen, ist aktueller denn je, da die genannten Parameter nicht nur für die GA von Bedeutung sind, sondern auch bei der geodätischen Nutzung künstlicher Erdsatelliten und beim Einsatz der *Langbasis-Interferometrie* (*Very Long Baseline Interferometry VLBI*) benötigt werden, um die Messergebnisse aus den einschlägigen zälestischen Bezugssystemen in erdfeste Bezugssysteme zu transformieren. Heute werden diese Parameter allerdings nicht mehr mit den optischen Verfahren der AG, sondern mit Satellitenverfahren (SILVERBERG, 1980; SEEGER, 1993, 206) und durch den Einsatz der Langbasisinterferometrie (VLBI) bestimmt (WILKINS, 1980/1; 1980/2; 1985; MELBOURNE, 1980).

Zu h) Passpunktbestimmung für kleinmaßstäbliche Vermessungen

Die astrogeodätische Passpunktbestimmung für kleinmaßstäbliche Vermessungen und zur Einpassung photogrammetrischer Blöcke ist grundsätzlich problematisch, da die astronomisch bestimmten Breiten und Längen nur die Lotrichtungen, nicht aber Positionen auf der Erde beschreiben (SIGL, 1975, 21). Die (Fehl-) Interpretation der Lotrichtungen als Lagekoordinaten auf einem Bezugsellipsoid führt zu Positionsfehlern in der Größenordnung »Lotabweichung mal Erdradius«. Die Fehler können daher allein schon aus diesem Grund mehrere 100 m erreichen. (Z.B. zieht eine Lotabweichung von $\theta = 10''$ einen Lagefehler von $(10''/\rho'') \cdot 6380 \text{ km} = 309 \text{ m}$ nach sich). Das Fehlerbudget wird darüber hinaus auch noch durch Messfehler bei der Breiten- und Längenbestimmung verschlechtert, die ebenfalls mit etwa 30m Positionsfehler pro 1" Messfehler zu Buche schlagen. Es liegt auf der Hand, dass derartige »Passpunkte« ein lokales Netz u.U. weit über die Zeichengenauigkeit der angestrebten Karte hinaus deformieren können. (In einer Karte 1 : 50000 entspricht die Zeichengenauigkeit von 0,1mm 5m in der Natur). Die gestellte Aufgabe lässt sich heute wesentlich genauer und schneller mit Satellitenverfahren lösen (SEEGER, 1993, 204-205).

Zu i) und j) Orts- Zeit- und Azimutbestimmungen auf Expeditionen

Vor der Erfindung der Funknavigation (während des zweiten Weltkrieges) standen zur absoluten Positionsbestimmung auf hoher See und in abgelegenen Regionen der Erde allein die astrogeodätischen Verfahren zur Verfügung, für die Azimutbestimmung darüber hinaus auch noch Magnet- und Kreiselkompass. Aus den gleichen Gründen, die bereits unter »Zu h)« dargelegt wurden, war die erreichbare Genauigkeit aber grundsätzlich beschränkt.

Die Funknavigation, wie z.B. LORAN, DECCA, OMEGA und die Verfahren der Satellitennavigation, insbesondere das GPS, haben die astrogeodätische Navigation mittlerweile fast völlig verdrängt. Der Grund hierfür liegt in der wesentlich höheren Positioniergenauigkeit, in der Wetterunabhängigkeit und in der sehr einfachen Handhabung (»press button«) der neuen Verfahren. Standardgeräte zur Orts- und Zeitbestimmung bei Expeditionen sowie für Freizeitaktivitäten auf Land Luft- und See sind heute tragbare (»handheld«) GPS- Empfänger.

1.5 Einsatzgebiete, in denen die Geodätische Astronomie an Bedeutung gewonnen hat

Zu e) Bestimmung von Lotabweichungen zur Ermittlung von Teilen des Geoids

In der Ära der »klassischen Landesvermessung« – wir verstehen darunter den Zeitraum vom Beginn der modernen Landesvermessung Anfang des 19. Jahrhunderts bis zum Einzug der Satellitenverfahren in die Geodäsie in den sechziger Jahren – mussten aus methodischen Gründen geodätische Lage- und Höhenbezugssysteme voneinander isoliert eingerichtet und geführt werden. Der Grund für diese Trennung war der in unterschiedlicher Weise »störende« Einfluss der physikalischen Felder der Schwere und der Refraktion auf die terrestrischen Messelemente (TORGE, 1980, 127).

Die Ergebnisse der *Lagemessung*, die im wesentlichen aus Triangulation hervorgingen, wurden auf ein *Bezugsellipsoid* übertragen. Dabei spielten die vorerwähnten Störeinflüsse nur eine sehr nachrangige Rolle. Der Versuch aber, auch die Ergebnisse der *Höhenmessung* auf ein Ellipsoid zu beziehen (und damit Lage- und Höhenmessung in einem einheitlichen, dreidimensionalen Bezugssystem zusammenfassen), scheiterte an der Schwierigkeit, das Schwerfeld der Erde und die atmosphärische Refraktion mit ausreichender Genauigkeit zu erfassen oder zu modellieren.

Indem die durch Nivellements (in Verbindung mit Schweremessungen) gewonnenen Ergebnisse der *Höhenmessung* auf das *Geoid* bezogen wurden, (dessen Struktur dabei unbekannt bleiben konnte) wurden die vorerwähnten Störeinflüsse weitgehend hintan gehalten.

Die räumlichen Beziehungen von Bezugsellipsoid und Geoid brauchen bei dieser Trennung von Lage- und Höhen Bezugssystem nur näherungsweise, nämlich in der Größenordnung von mehreren Metern bekannt zu sein. Aufgrund der gewählten Modellbildung erfolgte die Ableitung der Koordinaten (Lagekoordinaten und Höhen) aus den Messelementen (Winkel, Strecken, »nivellierten Höhen« (fast) ohne Informationsverlust, so dass die Messdaten aus den errechneten Koordinaten weitgehend reproduzierbar blieben. Die Kenntnis der »Geoidhöhen« (das sind die Abstände Bezugsellipsoid – Geoid) war nur zum Zwecke der Projektion (»Reduktion«) gemessener Strecken auf das Bezugsellipsoid erforderlich. Dabei wirkte sich aber ein Fehler von z.B. 6m auf das Ergebnis (nämlich die auf das Ellipsoid reduzierte Strecke) mit weniger als 10^{-5} (= 1 cm/km) aus, was im Vergleich mit den unvermeidlichen messtechnisch bedingten Streckenfehlern von damals größer als 10^{-5} hingenommen werden konnte.

Für die Auswertung von Nivellements, durch die in Verbindung mit Schweremessungen Geoid-bezogene Höhenunterschiede bestimmt werden, ist die Struktur und die Lage des Geoids relativ zum Bezugsellipsoid gänzlich ohne Belang.

Mit der Aufnahme der Satellitengeodäsie in das Arsenal geodätischer Messverfahren haben sich die Ansprüche an die Genauigkeit, mit der Lage und Struktur des Geoids benötigt werden, beträchtlich erhöht. Die mit Satellitenmethoden lösbaren Aufgaben der Geodäsie, der Geophysik, der Ozeanographie und des Bauingenieurwesens erfordern die Kenntnis der Geoidhöhen mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern (GERSTBACH, 1990; DENKER/TORGE, 1992). Die aus dem Bereich der Geodäsie kommende Antriebskraft dieser Entwicklung wird durch das Bestreben genährt, in absehbarer Zeit das arbeitsintensive (geometrische) Nivellement durch das wirtschaftlichere »*Satelliten-Nivellement*« (z.B. »*GPS-Nivellement*«) zu ergänzen oder gar zu ersetzen, was (wenigstens regional) eine noch feinere Auflösung bei der Beschreibung des Geoids voraussetzt (»cm - mm - Geoid«). Bei bekannter Geoidhöhe N können nach diesem Verfahren die mit Hilfe geodätischer Satelliten bestimmbaren Ellipsoidischen Höhen h in *Orthometrische Höhen* H überführt werden:

$$H = h - N. \quad (1.2)$$

Vor diesem Hintergrund hat die *Geoidbestimmung* heute größere Bedeutung als je zuvor. Zu Gebote stehen dabei gravimetrische, astrogeodätische und kombinierte Verfahren.

Die Verfahren der **gravimetrischen Geoidbestimmung** stützen sich auf *Schweremessungen*. Die *Geoidhöhen* N in Punkten P werden dabei durch Auswertung des *Stokeschen Integrals*

$$N = \frac{R}{4 \cdot \pi \cdot \bar{\gamma}} \cdot \iint_{\sigma} \Delta g_0 \cdot S\{\psi\} \cdot d\sigma \quad (1.3)$$

gewonnen (Heiskanen/Moritz, 1967, 94). In dieser Formel bedeuten R = Erdradius, $\bar{\gamma}$ = globaler Mittelwert der Schwere, $\Delta g_0 = g_0 - \gamma_0$ = *Schwereanomalien* in allen Flächenelementen (Punkten) $R^2 \cdot d\sigma$ der Erdoberfläche, wobei g_0 für die *auf das Geoid reduzierte Oberflächenschwere* g und γ_0 für die *Normalschwere* stehen. $S\{\psi\}$ ist die vom (sphärischen) Bogenabstand ψ zwischen P und dem jeweiligen Messpunkt des Schwerewertes g abhängige *Stokesche Funktion*, die das Gewicht der einzelnen Schwerebeobachtungen bestimmt. Die Integration ist über die gesamte Erdoberfläche zu führen. Bei der numerischen Auswertung des o.a. Integrals muss die Integration durch eine Summation über eine endliche Anzahl endlicher Flächenelemente ersetzt werden. Hierbei sind für die einzelnen $d\sigma$ Mittelwerte der Schwereanomalie Δg_0 und der Funktion $S\{\psi\}$ einzuführen (TORGE, 1980, 158). Von den der Anwendung des *Stokeschen Formel* (1.2-3) zugrunde liegenden Bedingungen:

- Ursprung, Achsenlage Masse und Potential von Geoid und Niveauellipsoid sind gleich,
- die gesamte Erdmasse liegt innerhalb des Geoids,
- das Schwerefeld der gesamten Erdoberfläche ist bekannt,

ist nur die erste erfüllbar. Die beiden anderen Bedingungen müssen im Rahmen von Hypothesen berücksichtigt werden (MÖNICKE, 1981, 13).

Die Oberflächenschwere lässt sich mit Hilfe von *Absolut- und Relativgravimetern* (TORGE, 1989, 128-255), durch Verfahren der *See- und Aerogravimetrie* (HEHL, 1992; KLINGELÉ/HALLIDAY/COCARD/KAHLE, 1995), durch die *Analyse von Satellitenbahnen* (REIGBER, 1969; SEEGER, 1993, 383; 415; SIGL, 1989; BAUERSIMA, 1989) und mit Hilfe von *Gradiometern auf Satelliten* (RUMMEL, 1991; BALMINO, 1991) gewinnen. Aus den verfügbaren Schwerefelddaten und unter Berücksichtigung von GEOS-3- und SEASAT-1-*Altimeterdaten* (HWANG, 1989) wurden bis dato zahlreiche Geoide abgeleitet (REIGBER, 1982; WENZEL, 1985, 4), globale auf einem Genauigkeitsniveau von $\frac{1}{2}$ m – 1 m (RAPP, 1989), kontinentale und nationale im dm-Bereich (GEIGER/KAHLE, 1986; DENKER, 1989; BAŠIĆ, 1989; TORGE/WEBER/WENZEL, 1983; DENKER/TORGE, 1992) und lokale mit einer Genauigkeit von wenigen cm (HEIN, 1978, 83-100; FORSBERG/MADSEN, 1990; MADSEN/TSCHERNING, 1990).

Kennzeichnend für die Verfahren der gravimetrischen Geoidbestimmung ist die Tatsache, dass sie eine extrem große globale Datenbasis benötigen (mehr als 1 Gbyte Messdaten), die nur in international angelegten Organisationsstrukturen bereit gestellt werden kann und daher nur wenigen entsprechend ausgerichteten Instituten bzw. Arbeitsgruppen zur Verfügung steht. Die Notwendigkeit der Bezugnahme auf eine globale Datenbasis gilt auch für die gravimetrische Bestimmung lokaler Geoide und der Lotabweichungen, was für den Wirtschaftlichkeitsvergleich mit den astrogeodätischen Verfahren der Geoidbestimmung von Bedeutung ist.

Das Verfahren der **astrogeodätischen Geoidbestimmung** stützt sich auf das von HELMERT (1880/I, 565) entwickelte *Astronomische Nivellement*, mit dem aus Lotabweichungen benachbarter Punkte Geoidhöhen-Unterschiede bestimmt werden können (LEVALLOIR, 1978, 403-421; TORGE, 1980, 141, 146). Für ein beliebiges, durch die Endpunkte P_i und P_k definiertes Geoidprofil erhält man für den betreffenden *Geoid-Anstieg*:

$$\Delta N_{ik} = N_k - N_i = - \int_i^k \theta_A \cdot dS_A + \int_i^k (\theta_A - \theta_{A0}) \cdot dS_A = - \int_i^k \theta_{A0} \cdot dS_A. \quad (1.4)$$

Zur flächenhaften Bestimmung eines Geoidausschnittes muss die Funktion $\Delta N = \Delta N\{\theta_{A0}, S\}$ durch ein Modell angenähert werden. Auch dieses Verfahren ist nicht hypothesenfrei. Die *Lotabweichung nach Pizzetti* θ_{A0} , die sich von der *Helmertschen Lotabweichung* θ_A um die durch die Lotkrümmung κ_{Ai} verursachte Änderung der Lotrichtung $\theta_{Ai} - \theta_{A0i} = \kappa_{Ai} \cdot H_i = dOK_{Ai}/dS_A$ unterscheidet, kann aus θ_A nämlich nur bei Kenntnis der örtlichen Dichtefunktion berechnet werden. Diese ist aber i.d.R. nur an der Erdoberfläche bekannt, und muss daher wie die *Orthometrische Korrektur* dOK_{Ai} , die sie repräsentiert, durch eine Hypothese beschrieben werden (MÖNICKE, 1981, 13).

Das Problem der unbekannten Dichteverteilung, das bei der gravimetrischen und der astrogeodätischen Geoidbestimmung auftritt, kann umgangen werden, wenn nicht das Geoid, sondern das *Quasigeoid* bestimmt wird (VANÍČEK/KRAKIWSKY, 1986, 117; TORGE, 1980, 141, 146), das bei geeigneter Höhendefinition (Normalhöhen) wie das Geoid als Höhenbezugsfläche in Betracht kommt.

Als Beispiel für eine nur linienweise Auswertung eines astronomischen Nivellements soll die 1990 im Zusammenhang mit dem Bau eines Eisenbahntunnels zwischen den dänischen Inseln Sjælland und Sprogø durchgeführte *Höhenübertragung über den Großen Belt* dienen (SCHÖDLBAUER/HEISTER/KRACK/SCHERER, 1992; SCHÖDLBAUER/GLASMACHER/HEISTER/KRACK/SCHERER, 1993).

Die Anwendung des Prinzips des astronomischen Nivellements auf Profile in verschiedenen Richtungen in einem rasterartig aufgebauten Punktfeld ermöglicht die flächenhafte Bestimmung des Geoids, allerdings ohne die dem gravimetrischen Verfahren immanente geozentrische Lagerung. Diese Lagerung muss hier durch den Höhenanschluss an einen Meerespegel, bzw., da dieser nicht notwendigerweise auf dem Geoid liegt, konventionell erfolgen.

Als Beispiele für astrogeodätisch bestimmte Geoide mögen die für den Bereich der alten Bundesländer (WOLF, 1949/2; 1956; HEITZ, 1969; HEINEKE/TORGE, 1979), für die Tschechoslowakei (BUCHAR, 1951; CIMBÁLNÍK, 1953), für die Schweiz (GURTNER, 1978; GURTNER/BÜRKI, 1987; MARTI/KAHLE, 1995), für Österreich (ERKER, 1983; BRETTERBAUER/GERSTBACH, 1983; ERKER/HOFMANN-WELLENHOF/MORITZ/SÜNKEL, 1996), für Slowenien und Kroatien (ČOLIĆ/BAŠIĆ/PETROVIĆ/PRIBIČEVIĆ/RATKAJEC/SÜNKEL/KÜHTREIBER, 1992; ČOLIĆ/PRIBIČEVIĆ/ŠVEHLA, 1998) und für Europa (BOMFORD, 1972) berechneten Geoide dienen.

Da in einem geschlossenen Arbeitsgebiet, insbesondere im Gebirge, astrogeodätisch bestimmte Lotabweichungen das Geoid besser definieren als die lokalen Schwerewerte – die Lotabweichungen lassen sich astrogeodätisch direkt messen, während sie auf der Grundlage von Schwerewerten und unter Anwendung von Differentialquotienten der Funktion (1.2-3) wie die Geoidhöhen nur aus global verteilten Daten abgeleitet werden können – ist bei astrogeodätischen Geoiden ein höheres Genauigkeitsniveau bei gleichzeitig geringerem Messaufwand zu erwarten (MÖNICKE, 1981, 13; GERSTBACH, 1997). Nach derzeitigem Kenntnisstand dürfte sich ein »cm-Geoid« nur auf der Grundlage astrogeodätisch bestimmter Lotabweichungen erreichen lassen.

Hier nur noch kurz erwähnt sei das von MOLODENSKI (1958, 84) entwickelte und in verschiedenen Variationen (z.B. CAMPBELL, 1971) angewandte Verfahren der **astrogravimetrischen Geoidbestimmung**, bei dem astrogeodätisch gemessenen Lotabweichungen und Schweremessungen miteinander verknüpft werden. Die Schwerewerte (Schwereanomalien) dienen hier im wesentlichen zur Interpolation der astrogeodätisch gewonnenen Lotabweichungen. Beispiele: *Astrogravimetrisches Quasigeoid im Bereich der (alten) Bundesrepublik Deutschland* (LELGEMANN, 1978; LELGEMANN/EHLERT/HAUCK, 1981), eine Studie eines lokalen Geoids »Prutz in Tirol« von DAXINGER (1996) und das im Entstehen begriffene »Austrian Geoid 2000« (ERKER/HOFMANN-WELLENHOF/MORITZ/SÜNKEL, 1995, 1996).

Abschließend kann im Hinblick auf alle dargestellten Verfahren der Geoidbestimmung festgehalten werden, dass eine zusätzliche Genauigkeitssteigerung möglich ist, wenn bei der Reduktion gemessener Lotabweichungs- und Schwerewerte auf das Geoid die Einflüsse von Topographie und Geologie berücksichtigt werden, was allerdings voraussetzt, dass *digitale Gelände- und Dichtemodelle* zur Verfügung stehen (BOEDECKER, 1975; HAITZMANN, 1983; RUESS, 1983; GRANSER/HÖSCH/STEINHAUSER/ZYCH, 1983; DENKER, 1988; BERNAUER/GEIGER, 1986; DAXINGER, 1996; GERSTBACH, 1997).

Zu f) Bestimmung von Lotabweichungen für Raumtriangulationen

Wie bereits dargelegt, war einer der Gründe (neben der Refraktion), warum in der klassischen Landesvermessung Lage- und Höhenmessungen getrennt und in unabhängigen Bezugssystemen ausgewertet wurden, die Schwierigkeit, das Schwerfeld der Erde mit der notwendigen Genauigkeit zu modellieren. Diese Einschränkung entfällt, wenn in ausreichender Dichte Lotabweichungen (als »Signale« des Erdschwerfeldes) zur Verfügung stehen.

Raumtriangulationen sind insbesondere im Gebirge von Interesse, da hier *räumliche* Netzstrukturen möglich sind, die im Vergleich mit ebenen, die Stabilität der Netze erhöhen. Ein unter Anbringung der Lotabweichungsreduktionen (1.1-6) und (1.1-4) an die beobachteten Horizontalwinkel- und Zenitdistanzen auf einem Bezugsellipsoid berechnetes räumliches Triangulationsnetz ist mit satelliten-geodätisch bestimmten dreidimensionalen Punktfeldern kompatibel (Wolf, 1963), was für gelegentliche Vergleiche der Messverfahren und zur gegenseitigen Stützung terrestrisch und Satelliten-gestützt bestimmter Punktfelder genutzt werden kann (ROTHACHER/BEUTLER/GURTNER/GEIGER/KAHLE/SCHNEIDER, 1986).

Zu k) Einmessung der Richtungen zu geodätischen Satelliten

Als Ramsayer (1970) diese Aufgabe beschrieb, hatte er die Beobachtung der ersten geodätischen genutzten passiven Ballon-Satelliten vom Typ ECHO, PAGEOS und EXPLORER oder der aktiven »Blitzlicht-satelliten« vom Typ ANNA und GEOS vor Augen, die mit »ballistischen Kameras« photographisch beobachtet wurden (SEEBER, 1993, 141). Satelliten diese Typs sind heute nicht mehr im Umlauf. Das Beobachtungsprinzip ist aber nach wie vor aktuell, nunmehr auf der Grundlage der CCD-Technik, etwa zur laufenden Kontrolle der Bahnen (»Positionen«) geostationärer Satelliten (POTTHOFF, 1993; GERSTBACH, 1996/1, 1996/2; PLONER, 1996; BRETTERBAUER, 1997).

Zu I) Absteckung der Nordrichtung zur Kalibrierung von Trägheitsnavigationsanlagen und nordsuchender Kreisel (Vermessungskreis)

Ein *Vermessungskreis* ist in der Lage, mit der an einem Torsionsband horizontal aufgehängten Achse seines Kreiselerotors die wahre Nordrichtung (= Richtung der auf die Horizontalebene projizierten momentanen Rotationsachse der Erde) zu sensieren (SCHÖDLBAUER, 1990/2). Sensitiv ist dabei allerdings nicht die mechanische Achse, sondern die Drehimpulsachse des Kreiselerotors. Diese zwei Achsen stimmen aber nicht notwendigerweise überein, insbesondere kann der mit der mechanischen Achse verbundene »Nordzeiger« von der physikalisch wirksamen Drehimpulsachse abweichen. Wenn mit einem Vermessungskreis die wahre Nordrichtung abgesteckt werden soll, muss daher der Unterschied zwischen der Drehimpulsachse und der Richtung des Nordzeigers durch Kalibrierung festgestellt werden. Dazu wird eine Kalibrierstrecke eingerichtet, deren Ausrichtung bezüglich der Nordrichtung (mit anderen Worten: deren Azimut) astrogeodätisch oder mit Satellitenverfahren (z.B. mit dem GPS) bestimmt werden kann. Das astrogeodätische Verfahren hat dabei den Vorzug, dass es das gesuchte Ergebnis direkt liefert, während ein satellitengeodätisch bestimmtes Azimut wegen des Einflusses der u.U. nicht bekannten Lotabweichungskomponente η erst noch korrigiert werden muss.

Auch kreiselgestützte *Trägheitsplattformen*, die der Navigation von Raum-, Flug-, See- und Landfahrzeugen dienen und auch im Vermessungswesen eingesetzt werden, sind bei stehendem Trägerfahrzeug in der Lage, die Nordrichtung zu sensieren. Ist diese Richtung festgestellt, was durch eine als »Ausrichtung« (engl.: *alignment*) bezeichnete Prozedur vor der Navigations- bzw. Messfahrt erfolgt (LECHNER, 1987), steht die Nordrichtung auch während der Fahrt als Kursreferenz zur Verfügung (SCHÖDLBAUER, 1985/1; 1985/2; 1987; CASPARY, 1987; JOOS, 1987). Um die an der Halterung der Plattform (i.d.R. ein cardanischer Rahmen) angezeigte Nordrichtung mit der »Fahrzeugachse« in Beziehung zu bringen, muss das System Fahrzeug-Trägheitsplattform anhand einer Richtungsreferenz mit bekanntem Azimut kalibriert werden. Auch für diesen Vorgang ist eine Kalibrierstrecke erforderlich, deren Einrichtung den gleichen Kriterien unterliegt wie eine Kalibrierstrecke für Vermessungskreis.

2 Entwicklung der theoretischen Grundlagen und des Instrumentariums der astrogeodätischen Messtechnik

2.1 Vorbemerkung

Die Beobachtungsgleichungen der GA, mit deren Hilfe aus zeitlich fixierten Winkelmessungen die Lotrichtungskomponenten Geographische Breite ϕ und Geographische Länge λ in einem Beobachtungsstandort abgeleitet werden können, stützen sich auf drei Informationsquellen:

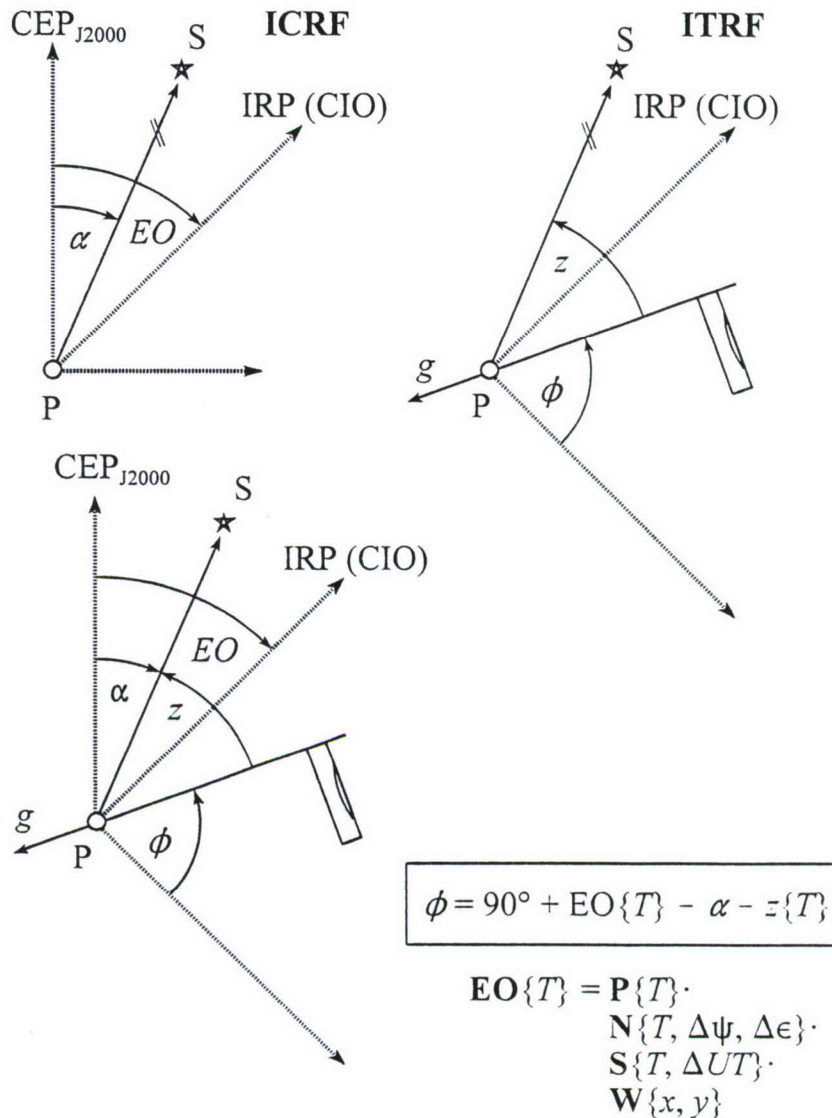
- ▶ auf die *Koordinaten* (Rektaszension α und Deklination δ) der Festpunkte des zugrunde liegenden zälestischen Bezugsrahmens,
- ▶ auf ein Modell der Erdorientierung (Vereinbarungen über eine Präzessionskonstante und ein Nutationsmodell, Annahme einer konstanten Drehgeschwindigkeit der Erde) sowie auf fünf als *Erdorientierungsparameter* $EOP1$ bis $EOP5$ bezeichnete Korrekturwerte (Polkoordinaten: $x = EOP1$, $y = EOP2$, Drehstatus der Erde: $UT1 - UTC = EOP3$; Verbesserungen des IAU-Nutationsmodells $EOP4 = \Delta\psi_{IAU}$, $EOP5 = \Delta\epsilon_{IAU}$), die in Verbindung mit den Modellvorgaben die Orientierung des terrestrischen Bezugsrahmens gegenüber dem zälestischen beschreiben, und
- ▶ auf die in eine Zeitskala eingeordneten *Beobachtungen* (Zenitdistanzen z und/oder Azimute a bzw. Pseudo-Zenitdistanzen und/oder (nicht orientierte) Horizontalrichtungen).

Die durch Genauigkeit, Zugänglichkeit und Aufwand der Bereitstellung bestimmte Qualität dieser drei Quellen konnte im Laufe der Zeit mehr und mehr verbessert werden. Im Zuge und als Folge dieser Entwicklung hat auch die Qualität der Ergebnisse zugenommen. Die Entwicklung, die diese Fortschritte zeitigte, soll im folgenden kurz skizziert werden. Zur Vereinfachung der Darstellung werden die oben genannten räumlichen Bezugsrahmen als ebene Rahmen betrachtet. Die im folgenden entwickelten Feststellungen werden durch diese Vereinfachungen nicht beeinträchtigt.

Die Zusammenhänge, die zwischen den vorgenannten Informationsquellen bestehen, sind in einem zweidimensionalen Modell in Bild 1 dargestellt. In diesem Modell kann ein Sternort durch einen

einzigem (konstanten) Richtungswinkel α beschrieben werden, die Erdorientierungsparameter reduzieren auf den zeitlich variablen Richtungswinkel $EO = EO(T)$ und als Beobachtungsgröße tritt nur noch eine einzige an der »Lotrichtung« orientierte, zeitlich ebenfalls variable »Zenitdistanz« $z = z(T)$ auf. Auch die Lotrichtungskomponenten reduzieren sich in diesem Modell auf einen einzigen (konstanten) Richtungswinkel, der hier die Bezeichnung ϕ erhält. Wie man Bild 1 entnehmen kann, reduziert sich in dem eingeführten 2d-Modell die Beobachtungsgleichung auf die lineare Beziehung:

$$\phi = 90^\circ - \alpha + EO\{T\} - z\{T\}.$$



Bei Kenntnis eines Sternorts α und der Erdorientierung $EO\{T\}$ kann aus der Beobachtung $z\{T\}$ auf die Lotrichtung ϕ geschlossen werden. Die im Bild 1 verwendeten Abkürzungen bedeuten: CEP = Zälestischer Ephemeridenpol im Zeitpunkt T , er ist ein konventionell definierter intermediärer Pol, der nur im dreidimensionalen Modell eine Rolle spielt; CEP_{J2000} = Mittlerer Zälestischer Ephemeridenpol zur Standardepoche J2000.0; IRP = erdfester IERS-Bezugspol; S = Stern. (Im dreidimensionalen Ansatz ist (1) nichtlinear und man braucht mindestens zwei Beobachtungen » z « um gleichzeitig ϕ und λ bestimmen zu können).

Für die Genauigkeit von ϕ wird man eine fehlergesetzliche Abhängigkeit zwischen α , EO und z auf der einen und ϕ auf der anderen Seite in dem Sinne erwarten dürfen, dass die Genauigkeit von ϕ umso höher sein wird, je genauer die Elemente α , EO und z sind. Analoge Feststellungen lassen sich auch hinsichtlich der anderen oben erwähnten Qualitätsmerkmale Zugänglichkeit und Aufwand treffen. Wenn sich

also die Entwicklungslinien der drei Informationsquellen » α «, » EO « und » z « positiv entwickeln, wird man gleichzeitig auch eine positive Entwicklungslinie der Qualität von » ϕ « erwarten dürfen. Allerdings ist eine Kette nur so stark wie ihr schwächstes Glied. Diese Erkenntnis gilt selbstverständlich auch für die aus α , EO und z zusammengesetzte Informationskette.

2.2 Entwicklung des Zälestischen Bezugsrahmens (» α «)

Ein Zälestischer Bezugsrahmen wird durch die in einem Fundamentalkatalog niedergelegten Positionen » α « und Positionsänderungen (Eigenbewegungen) $d\alpha/dT$ von Himmelskörpern beschrieben. Herausragende Beispiele solcher Kataloge sind (in chronologischer Folge):

Antike

- Der Katalog des HIPPARCH VON RHODOS (190-125 v.Chr.) und
- die »Syntaxis« (der Almagest) des CLAUDIUS PTOLEMÄUS (85-160 n.Chr.); GRASSHOFF (1990).

Die Präzession der Äquinoktien, die bei der Konstruktion und bei der Nutzung von Sternkatalogen eine wichtige Rolle spielt, war bereits Hipparch bekannt.

Neuzeit

- der Katalog des ULUGH BEG (1394-1449).
- die Kataloge von TYCHO BRAHE (1546-1601) und JOHANNES HEVELIUS (1611-1687), von JOHN FLAMSTEED (1646-1719), NICOLAS-LOUIS DE LACAILLE (1713-1762), JAMES BRADLEY (1692-1762), FRIEDRICH WILHELM BESSEL (1784-1846) und vieler anderer Astronomen.

Wichtige Entwicklungsschritte, die zu einer stetigen Verbesserung der Kataloge geführt haben, waren neben der Verbesserung der Beobachtungstechnik die Entdeckung von Eigenbewegungen einiger Fixsterne durch Edmund HALLEY (1718), der Aberration des Lichts und der Nutation durch James Bradley (1728) und einer ersten Fixsternparallaxe durch FRIEDRICH WILHELM BESSEL (1838).

Gegenwart

- Der Fundamentalkatalog FK5. Er enthält als Ergebnis langjähriger terrestrisch-optischer Beobachtungen die Positionen, Eigenbewegungen und Parallaxen (Entfernungen) von 1.535 Fundamentalsternen und von 3.117 »Zusatzsternen« mit einer Genauigkeit von $[\sigma_\alpha \cdot \cos \delta, \sigma_\delta] \approx 0,1''$.
- der Katalog der ICRF-Radioquellen als Ergebnis von wiederholten VLBI-Messungen. Er enthält die Positionen von 610 extragalaktischen Radioquellen mit einer Genauigkeit von $[\sigma_\alpha \cdot \cos \delta, \sigma_\delta] \approx 0,001''$.
- der HIPPARCOS-Katalog als Produkt der gleichnamigen astrometrischen Satellitenmission der ESA. In ihm findet man Positionen, Eigenbewegungen und Parallaxen von 118.218 Sternen. Die Positionsgenauigkeit beträgt $[\sigma_\alpha \cdot \cos \delta, \sigma_\delta] \approx 0,001''$. Unter den HIPPARCOS-Sternen befinden sich auch die FK5-Sterne, wodurch ein Anschluss an das FK5-Äquinoktium möglich war. Durch Anschlussmessungen zu den ICRF-Radioquellen, von denen etliche auch im Spektrum des sichtbaren Lichts leuchten, wurde darüber hinaus auch eine Verbindung zum ICRF hergestellt. Der HIPPARCOS-Katalog stellt daher eine Realisierung des ICRF im optischen Bereich dar (FEISSEL/MIGNARD, 1998).

Aufgrund der großen Anzahl von Sternen, die heute mit dem HIPPARCOS-Katalog als zälestische Festpunkte zur Verfügung stehen, gibt es bei keinem der in Betracht kommenden Beobachtungsverfahren noch Probleme bei der Sternauswahl. Da im übrigen die Genauigkeit der Sternkoordinaten deutlich über der Beobachtungsgenauigkeit liegt, kann man davon ausgehen, dass die Informationskette » α «, » EO « und » z « im Abschnitt » α « keine Wünsche offen lässt.

2.3 Entwicklung der Kenntnisse und Theorien über die Kinematik des terrestrischen Bezugsrahmens relativ zum zälestischen (Erdorientierung; » EO «)

Auch diese Entwicklung reicht von der Antike bis in die Gegenwart. Die folgende Übersicht gibt stichwortartig die z.T. seit unvordenklichen Zeiten bekannten, z.T. nach und nach entdeckten Phänomene, die die Kinematik des terrestrischen Bezugsrahmens relativ zum zälestischen bestimmen. Im Zuge dieser Entwicklung konnte Schritt um Schritt die Genauigkeit der Vorhersagen von Sternpositionen und – in

ihrer Folge – der astrogeodätischen Richtungsbestimmung verbessert werden.

Antike

- ▶ Scheinbare Drehung des Sternhimmels (Erddrehung): $360^\circ/\text{Tag}$
- ▶ Umlauf des Mondes um die Erde: $360^\circ/\text{Monat} \approx 13^\circ/\text{Tag}$
- ▶ Scheinbarer Umlauf der Sonne um die Erde (Umlauf der Erde um die Sonne): $360^\circ/\text{Jahr} \approx 1^\circ/\text{Tag}$
- ▶ Präzession der Äquinoktien bzw. des Himmelspols: $360^\circ/25800 \text{ Jahre} \approx 50''/\text{Jahr}$ (HIPPARCH)

17. Jahrhundert

- ▶ Kinematik der Planetenbahnen (JOHANNES KEPLER, 1609, 1619)
- ▶ Trägheits- und Gravitationsgesetz; Dynamik der Planetenbahnen (ISAAK NEWTON, 1686)

18. Jahrhundert

- ▶ Aberration des Lichts (JAMES BRADLEY, 1728)
- ▶ Nutation der Äquinoktien bzw. des Himmelspols (JAMES BRADLEY, 1748)

19. Jahrhundert

- ▶ Quantitative Analyse der Bahnbewegung der Erde (SIMON NEWCOMB, 1895)
- ▶ Quantitative Analyse der Bahnbewegung des Mondes (E. W. BROWN, 1896)
- ▶ Polschwankung (SETH CARLO CHANDLER, 1885; KARL FRIEDRICH KÜSTNER, 1890; SIMON NEWCOMB, 1891, 1892/1, 1892/2)

20. Jahrhundert

- ▶ Verfeinerungen des Nutationsmodells (E. W. WOOLARD, 1953; J. M. WAHR, 1981)
- ▶ Entdeckung von Schwankungen der Tageslänge und der Verlängerung des Tages (ADOLF SCHEIBE, UDO ADELSBERGER, 1936; HARALD SPENCER JONES, 1939; F. R. STEPHENSON, L. V. MORRISON, 1994)
- ▶ Laufende Beobachtung der Nutation ($\Delta\psi_{\text{IERS}}$, $\Delta\epsilon_{\text{IERS}}$), der Erddrehung ($\Delta UT = UT_1 - UTC$) und der Polbewegung (x_{IERS} , y_{IERS}) mit VLBI (International Earth Rotation Service (IERS)).

Als Ergebnis dieser Entwicklungen stehen auch die Erdorientierungsparameter heute mit einer Genauigkeit zur Verfügung, die weit über der Beobachtungsgenauigkeit erdgebundener optischer Beobachtungsverfahren liegt, so dass auch »EO« in der Informationskette »α«, »EO« und »z« keine Wünsche offen lässt.

In diesem Zusammenhang verdient auch die Entwicklung der Uhren und der Zeitsysteme Beachtung, da die genaue Feststellung und Berücksichtigung des Erdorientierungsparameters ΔUT hochgenaue Uhren und eine klare Definitionen der in Betracht kommenden Zeitskalen erfordert.

Entwicklung der Uhren

- ▶ Pendeluhrn (CHRISTIAN HUYGENS, 1656). Von herausragender Bedeutung erwies sich die Erfindung einer seetauglichen Pendeluhr (JOHN HARRISON, 1750). Denn erst mit dieser von der britischen Admiralität hochbelohnten Erfindung konnte das Problem der Längenbestimmung gelöst werden.
- ▶ Quarzuhrn (WARREN ALVIN MARRISON, 1928). Mit solchen Uhren, die die Schwingfähigkeit von Kristallen und den piezoelektrischen Effekt des Quarzes nutzen, gelang erstmals der experimentelle Nachweis, dass die Erddrehung unregelmäßig ist.
- ▶ Atomuhren: Caesium-Uhr (L. ESSEN, J.V.L. PARRY, 1955), Rubidium-Uhr, Wasserstoff-Maser, etc.. Die Frequenzgeneratoren, die diesem Uhrentyp zugrunde liegen, nutzen Frequenzen im Mikrowellenbereich, die beim Übergang benachbarter atomphysikalisch definierter Schwingungszustände der betreffenden Atome entstehen (Hyperfeinstruktur-Übergänge). Aufgrund ihrer hohen Stabilität sind diese Uhren nicht mehr nur Hilfsmittel der Zeitinterpolation. Sie haben vielmehr von der Astronomie die Rolle eines primären Zeitnormalen übernommen.

Entwicklung der Zeitsysteme

Die Entwicklung der Zeitsysteme hängt eng mit dem Verständnis der periodischen Bewegungen zusammen, deren Frequenzen als Maßstab der Zeitzählung verwendet wurden oder in Betracht gezogen werden. Kriterien der Eignung einer bestimmten Bewegung als Zeitskala sind ihre »Gleichförmigkeit« und ihre allgemeine Zugänglichkeit. Als »gleichförmig« wird eine Zeitskala angesehen, wenn es auf ihrer Grundlage gelingt, »zeitabhängige« physikalische Vorgänge (physikalische Prozesse, z.B. mechanische

Bewegungen oder atomphysikalisch erzeugte Frequenzen) möglichst einfach zu beschreiben. Welcher Vorgang der Zeitzählung tatsächlich zugrunde gelegt wird und wurde, ist eine Frage der Vereinbarung. Seit Menschengedenken bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts diente die rotierende Erde als Generator einer von allen Kulturen getragenen natürlichen Zeitskala. Heute wird weltweit (kraft Vereinbarung) eine atomphysikalisch definierte Frequenz der Zeitzählung zugrunde gelegt. Im einzelnen lassen sich folgende Entwicklungsschritte bzw. vereinbarte Frequenzgeneratoren unterscheiden:

- ▶ Bis 1956 als Grundlage der bürgerlichen Zeitzählung, für astro- und satellitengeodätische Aufgaben bis heute und auch künftig: Erddrehung. An die Erddrehung bzw. an die scheinbare Bewegung der (mittleren) Sonne und der Fixsterne ist die als Weltzeit (*UT1*) bezeichnete Zeitskala gebunden. Als Zeiteinheit dient eine ganze, auf die mittlere Sonne bezogene Erdumdrehung = 1 Tag bzw. der als Sekunde bezeichnete Bruchteil eines Tages: $1\text{ s} = 1/86400$ Tag. Die Weltzeitskala wird aus Sternbeobachtungen abgeleitet.
- ▶ 1956-1967: Umlauf der Erde um die Sonne. Die so basierte Zeitskala wird als Ephemeridenzeit (*ET*) bezeichnet. Als Zeiteinheit dient 1 Umlauf der Erde um die Sonne = 1 Tropisches Jahr bzw. eine mit der oben definierten Weltzeitsekunde weitgehend übereinstimmende Ephemeridensekunde $1\text{ s} = 1/31\,556\,925,9747$ Tropisches Jahr der Epoche 1900,0. Die Skala der Ephemeridenzeit wurde aus Mondbeobachtungen abgeleitet.
- ▶ Seit 1967: Schwingungsdauer der bei einem definierten atomphysikalischen Prozess im Cäsiumisotop 133 entstehenden Strahlung.
Zeitskala: Internationale Atomzeit *TAI*.
 $1\text{ s} = 9\,192\,631$ Schwingungen der bei einem definierten Hyperfeinstruktur-Übergang entstehenden Strahlung
- ▶ Seit 1976: Berücksichtigung speziell- und allgemein-relativistischer Effekte
1976: Terrestrische und Baryzentrische dynamische Zeit (*TDT*, *TDB*)
1991: Geozentrische und Baryzentrische Koordinatenzeit (*TCT*, *TCB*); gleichzeitig Umbenennung der *TDT* in Terrestrische Zeit (*TT*).

Die Entwicklung geeigneter Transformationsformeln für die Übergänge zwischen den verschiedenen relativistischen Zeitsystemen ist noch nicht abgeschlossen: Die Internationale Astronomische Union diskutiert derzeit weitere Präzisierungen der einschlägigen Transformationsformeln (Groten, 2000).

2.4 Entwicklung der Instrumente und der Beobachtungsverfahren (»z«)

2.4.1 Das klassische Instrumentarium der Geodätischen Astronomie mit aktivem Beobachter

Das klassische Instrumentarium der GA war weitgehend identisch mit dem der Astrometrie. Beide Bereiche stützten sich auf Winkelmessverfahren mit optischen Instrumenten. Unterschiede betrafen lediglich die Genauigkeit und die Transportfähigkeit der Instrumente. Für die Aufgaben der Astrometrie verwendete man stets ortsfeste Instrumente, bei denen das Gewicht keine Rolle spielte. In der GA war man auf hingegen auf leichtere, für den Transport geeignete Instrumente angewiesen, die allein schon aufgrund der kleineren und leichteren Bauart nicht den Genauigkeitsstandard der astrometrischen Instrumente erreichten.

Dieser enge Bezug zwischen Astrometrie und GA, der stets auch die instrumentellen Entwicklungen der GA stimulierte, geht mehr und mehr verloren. So ist der derzeit vereinbarte Zälestische Bezugsrahmen (ICRF = IERS Celestial Reference Frame) nicht mehr allein auf eine erdgebundene Vermessung des Sternhimmels gegründet, wie dies noch bei der Konstruktion der klassischen Fundamentalkataloge notwendig war, sondern zum überwiegenden Teil auf die Ergebnisse der astrometrischen ESA-Satellitenmission HIPPARCOS (KOVALEVSKY/LINDGREEN/PERRYMAN u.a., 1997). Auch bei der laufenden Bestimmung der Erdorientierungsparameter (Polkoordinaten x , y , Weltzeit-Atomzeit-Ablage ΔUT und Korrekturen des IAU-Nutationsmodells $\Delta\psi$, $\Delta\epsilon$) hat sich ein grundlegender Wandel vollzogen: Die optischen Winkelbeobachtungen wurden von interferometrischen Winkelmessungen mit Hilfe der Langbasisinterferometrie und von Entfernungsmessungen zu geodätischen Satelliten (SLR, GPS) und zum Mond abgelöst.

In der GA hingegen benötigt man zum Anschluss der Lotrichtungen an das ICRF, der nur mit optischen Verfahren erreicht werden kann, nach wie vor ein nach den Gesetzen der geometrischen Optik ausgelegtes erdgebundenes Instrumentarium. Da die mit der Astrometrie befassten Institutionen auf diesem Gebiet keine Vorarbeit mehr leisten, ist man im Bereich der GA gezwungen, bei den notwendigen instrumentellen Entwicklungen weitgehend eigene Wege zu gehen. Noch gibt es aber aus dem Bereich der Astrometrie zahlreiche in Prototypen entwickelte Anregungen zur Automatisierung von Sternbeobachtungen, die auch bei der Konstruktion von mobilen astrogeodätischen Instrumenten von Interesse sind.

Instrumente und Messmodi

Die klassischen Methoden der Breiten- Längen und Azimutbestimmung stützten sich vor allem auf folgende Instrumente:

- ▶ Durchgangsinstrument (Passageinstrument)
- ▶ Universalinstrument (astronomisches Universal, astronomischer Theodolit)
- ▶ Astrolab (Zirkumzenital).

Daneben gibt es noch eine Reihe von Mischformen, z.B. den Meridiankreis, das Zenit-Teleskop, oder das Universal-Teleskop (MUELLER, 1969, 250-252).

Wesentlicher Bestandteil aller Instrumente ist ein Messfernrohr mit einer durch das optische Zentrum des Objektivs und einem Fadenkreuz definierten (zentralen) Zielachse. Falls das aus einem Horizontal- und einem Vertikalfaden gebildete Fadenkreuz um eine Reihe von parallelen Fäden zu einem Raster von Fäden erweitert ist (Strichplatte), so definieren die Schnittpunkte der Parallelfäden mit dem eigentliche Fadenkreuz weitere, laterale Zielachsen, die von der zentralen Zielachse um bestimmte Winkelbeträge abgesetzt sind. Das Fernrohr ist im Instrumentenunterbau drehbar gelagert. Je nach Instrumententyp sind bei dieser Lagerung ein oder zwei Freiheitsgrade zugelassen. Im ersten Fall (ein Freiheitsgrad, z.B. beim einfachen Durchgangsinstrument oder beim Astrolab) besteht das Instrument aus einem Unterbau, der zur Horizontierung mit einem Dreifuß versehen ist, und einem einachsigen (mittels Kipp- oder Stehachse) drehbar gelagerten Fernrohr. Im zweiten Fall (zwei Freiheitsgrade, z.B. bei einem Universal) ist zwischen dem Fernrohr und dem Geräteunterbau noch ein »Geräteoberteil« eingefügt. Dieses Bauteil trägt und führt die zur Fernrohrachse senkrechte Kippachse und ist selbst mit der Stehachse im Geräteunterbau drehbar gelagert. In justiertem Zustand liegt der »Horizontalfaden« des Fadenkreuzes parallel zur Kippachse und senkrecht zur Ziel- und zur Stehachse; der »Vertikalfaden« steht senkrecht zum Horizontalfaden, zur Zielachse und zur Kippachse. Bei idealer Aufstellung des Gerätes, die mit Hilfe von Lotsensoren (z.B. mit Libellen) erfolgt, liegt die Kippachse horizontal und die Stehachse ist am örtlichen Lot ausgerichtet. Von einer solchen idealen Aufstellung wird bei den nachfolgenden Erläuterungen ausgegangen.

Beim *Durchgangsinstrument* kann das Fernrohr nur um seine Kippachse geschwenkt werden. Die freie Bewegungsmöglichkeit des Fernrohrs ist dadurch auf eine durch die Aufstellung des Instruments definierte Vertikalebene beschränkt. Daraus folgt, dass mit dem Vertikalfaden des Fadenkreuzes nur solche Sterne beobachtet werden können, die innerhalb des vorgesehenen Beobachtungszeitraums auf ihrer scheinbaren Bahn den zur Kippachse senkrecht stehenden Vertikalkreis überschreiten. Durch die Beobachtung der Durchgangszeitpunkte kann bei Ausrichtung der Zielachse in der Meridianebene die geographische Länge des Beobachtungsstandortes, bei Ausrichtung auf die Vertikalebene eines terrestrischen Zieles dessen Azimut bestimmt werden. Wird an der Kippachse senkrecht zu dieser Achse eine Röhrenlibelle (Horrebow-Libelle) befestigt, mit der bei einspielender Libelle eine bestimmte Fernrohrneigung fixiert wird, so kann das Instrument zur genauen Breitenbestimmung nach dem Horrebow-Talcott-Verfahren verwendet werden. (Bei diesem Verfahren werden mit einem Okularmikrometer Differenzen von Zenitdistanzen gemessen, der Durchgangszeitpunkt spielt keine Rolle). Unbekannt bleiben bei diesen für das Instrument typischen Beobachtungsanordnungen die Zenitdistanzen, in der die Durchgänge erfolgen.

Beim *Astrolab* ist die Zielachse um einen festen, konstruktiv vorgegebenen Winkel (dessen Wert allerdings nur näherungsweise bekannt ist), gegen die Horizontalebene geneigt. Das Fernrohr (und mit ihm die Zielachse) kann um die Stehachse in jede beliebige Vertikalebene geschwenkt werden. Durch eine

entsprechende Horizontiereinrichtung (Libelle, Quecksilberhorizont, »Kompensator«) wird erreicht, dass die Zielachse nur auf dem Mantel eines Kreiskegels bewegt werden kann, dessen Achse zum Zenit zeigt. Die lateralen Zielachsen auf dem Vertikalfaden bewegen sich dabei auf den Mantellinien anderer Kreiskegel mit gleicher Ausrichtung wie der zentrale Kegel. Als Ziele kommen beim Astrolab nur solche Sterne in Betracht, die im vorgesehen Beobachtungszeitraum die von der zentralen und den lateralen Zielachsen definierten Almukantarate (Parallelkreise zum Horizont) durchlaufen. Als Messwerte werden die Durchgangszeitpunkte durch Kreise erfasst. Unbekannt bleiben bei dieser Beobachtungsanordnung die Azimute, in denen die Durchgänge erfolgen. Durch die Beobachtung der Durchgänge von mindestens drei über den Horizont verteilten Sternen durch den gleichen Horizontalfäden lassen sich mit dem Astrolab gleichzeitig die geographische Breite und die geographische Länge des Standortes bestimmen (GAUß, 1808; BARTELS, 1961; ZIMMERMANN, 1965; RÖDDE, 1970; DEICHL, 1975; BOZORGZADEH, 1977).

Eine Sonderform des Astrolabs ohne Fadenkreuz bzw. Strichplatte ist das Danjon-Prismenastrolab (DANJON, 1969; KOVALEVSKY, 1994, 168-169). Bei diesem Instrument wird der Almukantarate durch die Mitte der unsichtbaren Schnittlinie zweier gespiegelter, übereinander projizierter Bilder des Fernrohrgesichtsfeldes, des direkten Bildes und eines an einem Quecksilberhorizont gespiegelten definiert. Im Augenblick des Sterndurchgangs durch diesen Almukantarate treffen sich die Spuren des direkten Bildes und des Spiegelbildes in einem Punkt.

Beim Durchgangsinstrument und beim Astrolab braucht der Beobachter, wie oben dargelegt, nur eine Komponente der Sternbewegung im Auge behalten, beim Durchgangsinstrument die horizontale, beim Astrolab die vertikale. Die Beschränkung der Messung auf nur eine Bewegungskomponente kommt der Messgenauigkeit zugute, denn der Beobachter kann sich ganz auf den Durchgang des Sterns durch nur einen Faden konzentrieren. Bemerkenswert an beiden Instrumententypen ist der Verzicht auf Teilkreise.

Beim *Universal* (Universal-Theodolit) ist das Fernrohr zweiachsig gelagert. Das Fernrohr kann daher im Prinzip jederzeit auf jeden sichtbaren Stern gerichtet werden und dessen Polarkoordinaten am Horizontal- und Vertikalkreis abgelesen werden. Die genaue Einstellung eines Sterns mit der zentralen Zielachse ist aber, da sich der Stern bewegt und der Beobachter die horizontale und die vertikale Bewegungskomponente des Sterns gleichzeitig verfolgen müsste, weniger genau als die Beobachtung eines Sterndurchgangs durch den Horizontal- oder den Vertikalfaden. Aus diesem Grund wird auch das Universal in aller Regel nur zur Beobachtung von »eindimensionalen Sterndurchgängen« eingesetzt oder zur Messung von Zenitdistanzen oder Horizontalrichtungen in Konstellationen, in denen sich der Stern parallel zum Horizontalfaden (im Meridian) oder parallel zum Vertikalfaden (Stern in Größter Digression) bewegt. Bei Durchgangsbeobachtungen wird also mit dem Universal entweder ein Durchgangsinstrument (Durchgänge durch einen oder mehrere Vertikalfäden) oder ein Astrolab (Durchgänge durch einen oder mehrere Horizontalfäden) simuliert. Der Vorteil des Universals gegenüber den anderen Instrumenten liegt in der höheren Flexibilität der Zielauswahl, die nun nicht mehr auf die geometrischen Örter bestimmter Vertikalkreise oder Almukantarate beschränkt ist.

2.4.2 Maßnahmen zur Entlastung des aktiven Beobachters

Halbautomatische Durchgangsbeobachtung mit beweglichen Fäden und einem Registriermikrometer bzw. mit einem selbstregistrierenden Universal

Ein in Verbindung mit allen in 2.1 geschilderten Instrumenten einsetzbares Hilfsmittel, mit dem kleine Winkel innerhalb des Gesichtsfeldes eines Fernrohr mit erhöhter Genauigkeit gemessen werden können, ist ein beweglicher Faden, dessen momentane Winkelablage gegen eine fiktive zentrale Zielachse an einem Okularmikrometer abgelesen werden kann. Der Faden, der während der Zielverfolgung eine stetige Reihe von Zielachsen definiert, wird durch Drehen am Mikrometer mit dem beweglichen Ziel mitgeführt. Die bei einer Durchgang eines Sterns durch einen feststehenden Faden auf einen einzigen Augenblick beschränkte Beobachtung gestaltet sich bei einem mit dem Stern mitgeführten beweglichen Faden wie die Beobachtung eines festen Zielpunkts. Im übrigen sind die Durchgangsbeobachtungen im Gegensatz zur Messanordnung 2.2 nicht auf ein vorgegebenes festes Fadenraster beschränkt.

Ein Okularmikrometer ist die Grundlage für das von REPSOLD vor mehr als 100 Jahren erfundene und mittlerweile vielfach variierte Registriermikrometer zur quasikontinuierlichen automatischen Registrierung diskreter Winkelablagen w_1 eines Beobachtungsfadens gegenüber einer festen Bezugsrichtung w_0 .

Die Trommel des Mikrometers, das die Bewegung des Fadens steuert, ist mit gleichabständigen Kontaktelektroden versehen, die proportional zur Winkelgeschwindigkeit der Drehung über einen Abgriff einen elektrischen Stromkreis öffnen und schließen. Werden die dabei freigegebenen elektrischen Signale in einem Chronographen registriert, so entsteht automatisch eine Zeitreihe $t_i = t\{w_i\}$, die den Zusammenhang zwischen Winkelablage des Fadens und dem Beobachtungszeitpunkt beschreibt. Wird nun ein in dieser Weise gesteuerter Faden mit einem durch das Gesichtsfeld des Fernrohrs ziehenden Stern mitgeführt – der Antrieb kann manuell oder durch einen vom Beobachter kontrollierten Motor erfolgen –, so beschreibt die dann gewonnene Zeitreihe die Winkelablagen des Sterns relativ zu einer definierten »zentralen Lage« des Fadens w_0 . Über die aus der o.a. Zeitreihe empirisch gewonnene Funktion $t = t\{w\}$ findet man den Durchgangszeitpunkt $t_0 = t\{w_0\}$ durch den zentralen Vertikal oder Almukantarat. Eine solche Messanordnung hat über die Fähigkeit der automatischen Registrierung hinaus den Vorzug, dass persönliche Beobachtungsfehler (RAMSAYER, 1970, 266) weitgehend ausgeschlossen sind.

Ähnlich wie mit einem Registriermikrometer ist der Beobachtungsablauf beim Einsatz eines selbstregistrierenden Theodolits, der die Teilkreisablesungen in digitaler Form bereitstellt.

Halbautomatische Mess- und Auswertesysteme

Mikroprozessoren und tragbare PC haben die Möglichkeiten der Automatisierung der Beobachtungs- und Auswertevorgänge beträchtlich erweitert. Bei entsprechender Ausrüstung der Rechner mit geeigneter Software kann jederzeit auf die Koordinaten und Koordinatenänderungsraten der Sterne des FK5 (einschließlich Supplement), auf die astronomischen Konstanten und auf das IAU-Nutationsmodell zugegriffen werden. Auch die von Zeitdiensten über Funk verbreitete oder die mit den GPS-Signalen ausgestrahlte UTC- bzw. Atomzeitskala steht, wenn der Rechner mit einer entsprechenden Karte ausgerüstet ist, vor Ort zur Verfügung. So lassen sich die topozentrischen scheinbaren Sternkoordinaten für jeden beliebigen Beobachtungsstandort und -zeitpunkt ad hoc berechnen und unter Berücksichtigung der gleichzeitig automatisch anfallenden meteorologischen Daten mit den gemäß 3.1 registrierten Messwerten t_i und/oder w_i verknüpfen. Abgesehen von kleineren Korrekturen, die erst nach einigen Wochen angebracht werden können, wenn die zum Beobachtungszeitpunkt gültigen Erdorientierungsparameter (siehe 2.1) zur Verfügung stehen, können so schon im Feld die gesuchten Breiten, Längen und /oder Azimute angegeben und auf ihre Plausibilität geprüft werden. (SOLARIĆ, 1984; 1991; 1996; WALSER, 1987; IGP, 1989; SOLARIĆ/ŠPOLJARIĆ, 1993; SOLARIĆ/ŠPOLJARIĆ/VRESK/SKENDER, 1991).

2.4.3 Vollautomatische photoelektrische Durchgangsregistrierung

Die 3.2 beschriebenen Systeme setzen wie das klassische Instrumentarium einen erfahrenen Beobachter voraus, der die notwendigen Einstellungen der Sterne tätigt. Durch den Einsatz photoelektrischer Bauelemente ist es mittlerweile gelungen, den Beobachter ganz aus dem Beobachtungsprozess herauszunehmen. Dabei sind die im folgenden skizzierten Entwicklungslinien erkennbar.

Modulation des Sternlichts durch ein Strich- oder Schlitzraster

In der Bildebene des Fernrohrobjektiv befindet sich bei diesem System ein Strich- oder Schlitzraster, dahinter ein lichtempfindlicher Sensor, z.B. einem Sekundärelektronenvervielfacher (SEV), der den gesamten in der Bildebene des Objektivs ankommenden Lichtfluss in ein elektrisches Signal umsetzt.

Ohne das erwähnte Raster erzeugt das Bild eines Sterns, das durch das Gesichtsfeld des Fernrohrs wandert, zusammen mit der Hintergrundhelligkeit des Himmels im Gesichtsfeld einen konstanten Lichtfluss. Durch das Strich- oder Schlitzraster wird der Stern in bestimmten Zeitintervallen abgedeckt (beim Strichraster während er kurzzeitig hinter dem Faden verschwindet, beim Schlitzraster auf dem Weg von einem Schlitz zum nächsten). Der Lichtfluss wird so periodisch abgesenkt. Der SEV nimmt den Lichtfluss auf und wandelt ihn in ein entsprechendes elektrisches Signal um. In den Weg- und Zeitabschnitten, in denen das Sternlicht ungehindert den SEV erreicht (zwischen den Strichen bzw. in den Schlitzen), bewegt sich das Signal auf maximalem, dort wo es abgedeckt wird auf minimalem Niveau. Wird nun das vom SEV erzeugte modulierte elektrische Signal mit dem vom Chronographen vorgegebenen Zeitraster korreliert, so gewinnt man in der gleichen Weise wie nach den Verfahren 3.1 und 3.2 eine Zeitreihe $t_i = t\{w_i\}$, die die Durchgangsepochen durch die Fäden oder die Schlitzbe-

schreibt. Durch eine Analyse der Zeitreihe findet man die im besonderen interessierende Durchgangsepoche $t_0 = t\{w_0\}$ durch einen fiktiven Zentralfaden. (DITTRICH/FISCHER, 1990; KOVALEVSKY, 1994, 172-174; SCHOTT/ZICK, 1995, 235-241).

Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern, wird das Fernrohr Gesichtsfeld durch eine mit dem Stern mitgeführte Schlitzblende auf einen kleinen Bereich um den abgebildeten Stern herum eingeschränkt. Durch diese Maßnahme vergrößert sich der Abstand zwischen dem Maximum und dem Minimum des Lichtflusses und das System reagiert wesentlich sensibler.

Nachführung der Zielachse durch Stellmotor

Ein Fixstern bewegt sich aus der Sicht eines erdfesten Beobachters als Folge der Erddrehung mit einer Winkelgeschwindigkeit von $(15''/s) \cdot \cos \delta$ parallel zum Himmelsäquator. Man kann das Sternbild relativ zu einem Beobachtungsfernrohr fixieren, wenn die Zielachse (Fadenkreuz oder ganzes Fernrohr) durch einen Stellmotor der Bewegung des Sterns nachgeführt wird. An diesem Messprinzip ist schon in den 50er Jahren intensiv gearbeitet worden, wenn auch – aus heutiger Sicht – mit unzureichenden Mitteln (z.B. RAMSAYER, 1962; JOECKEL, 1975). Die Nachführung wird heute von Regelkreisen besorgt, der von den Signalen eines SEV oder eines CCD gesteuert werden. Zur Lösung dieser Aufgabe sind verschiedene Wege beschritten worden, die folgenden in jüngerer Zeit (KOVALEVSKY, 1994, 148-156):

– *Mikrometer mit rotierender Maske – Rotating Mask Micrometer* (REQUIÈME, 1973)

Das Mikrometer besteht aus einem in der Bildebene der Fernrohrobjektives beweglichen Wagen, der eine rotierende Halbkreisblende trägt. Der Wagen (und mit ihm die Blende) wird entsprechend der ad hoc berechneten Sternspur mit dem Stern mitgeführt. Könnte man die Rotationsachse der Blende von vorne herein exakt am Stern ausrichten, so würde der durch den Wirkungsbereich der Blende fließende Lichtfluss halbiert werden. Da dieser Fluss vor dem Eintritt in die Blende konstant ist, wäre er es auch dahinter. Nun stimmt die Rotationsachse der Blende zu Beginn der Regelung in aller Regel nicht exakt mit der Sternposition überein, der Stern »steht« also zunächst abseits von dieser Achse. In exzentrischer Lage erzeugt die Drehblende einen mit der Umdrehungsfrequenz variablen Lichtfluss, aus dessen Verlauf (Phase und Amplitude) das System die Ablage der Rotationsachse vom Zentrum des Sterns errechnet. Diese Information wird genutzt, um die Bewegung des Wagens im Sinne der beabsichtigten Zentrierung zu korrigieren. In zentrierter Lage gibt das mit dem Wagen verbundene Mikrometer laufend die Sternpositionen an. Sie werden wie bei den bereits besprochenen Registriermikrometern als Zeitreihe weitergegeben.

Ein System dieser Art ist im Astronomischen Observatorium von Bordeaux in einem Meridiankreis eingebaut. Es erlaubt die gleichzeitige Bestimmung des Zeitpunkts und der Zenitdistanz eines Sterns beim Meridiandurchgang.

– *Mikrometer mit schwingendem Gitter – Oscillating Grid Micrometer* nach HÖG (HELMER/MORRISON, 1985)

Das Mikrometer ist wie das soeben beschriebene System auf einem Wagen montiert, der anhand der bekannten Sternposition und -geschwindigkeit in der Bildebene des Fernrohrs automatisch mit dem Stern mitgeführt wird. Auch dieses System ist in einem Meridiankreis eingebaut und dient so zur Bestimmung des Zeitpunkts und der Zenitdistanz der beobachteten Sterne beim Meridiandurchgang. Als Modulator des Lichtflusses dient eine Maske, die mit zwei zueinander senkrecht angeordneten, um 45° gegen die horizontale Bewegungsrichtung des Sterns geneigten Schlitzfenstern versehen ist. Die Maske wird auf dem Wagen parallel zur Bewegungsrichtung des Sterns periodisch hin und her geführt. Während dieser Schwingung geben die beiden Schlitzfenster den von der Maske unterbrochenen Lichtfluss in einem bestimmten, im allgemeinen unregelmäßigen Zeittakt frei. Ein hinter der Maske angebrachter SEV wandelt den Lichtfluss in elektrische Signale um und erzeugt eine Sequenz von Spannungsmaxima, die über eine Zeitregistriereinheit einem vorgegebenen Zeitrahmen zugeordnet wird. Aus der zeitlichen Folge der Lichtflussmaxima ergibt sich der Koordinatenunterschied zwischen einer idealen Lage des Wagens, bei der das Bild des Sterns in den Schnittpunkt der beiden Schlitzfenster fallen würde, und der tatsächlichen Position des Wagens. Kennt man den Koordinatenunterschied, so kann auch der genaue Zeitpunkt und die tatsächliche Zenitdistanz des Sterndurchgangs durch den Meridian angegeben werden (KOVALEVSKY, 1994, 150-154).

Ein Messsystem dieser Art findet man in den Meridiankreisen der Observatorien von Carlsberg, La Palma und Tokio.

- *Mikrometer mit elektronischem Bildteiler – Image Dissector*
(HUGHES/ROBINSON/GAUSS/STONE, 1986)

Ein elektronischer Bildteiler ist eine Art SEV, der ein elektronisches Bild eines auf die Eingangskathode projizierten Bildes erzeugt. Dieses Bild kann elektromagnetisch abgelenkt und so jedes Bildelement über eine kleine Blende einem Lichtdetektor zugeführt werden. Der durch die Elektromagneten fließende Strom ist ein Maß für die Ablenkung. Durch Scannen im Bereich eines vorgegebenen Raumwinkels erzeugt der Bildteiler ein Bild, das in einem definierten Koordinatensystem die Helligkeitsverteilung in diesem Winkelsektor wiedergibt. Wie bei den beiden vorher beschriebenen Mikrometern bewegt sich ein in der Bildebene des Fernrohrobjektivs angebrachter Wagen, der hier eine Strichplatte trägt mit der vorausberechneten Geschwindigkeit des Sterns durch das Gesichtsfeld. Der mit dem Wagen bewegte Bildteiler scannt in einem Kalibriergang bei geschlossenem Fernrohrverschluss die beleuchtete Strichplatte und anschließend, bei offenem Verschluss und unbeleuchteter Strichplatte, den abgebildeten Ausschnitt des Himmels. Der (automatische) Vergleich der beiden Bilder liefert die Sternkoordinaten relativ zu dem von der Strichplatte vorgegebenen Rahmen, dessen Durchgang durch den Meridian an den der vorausberechneten Sternspur gebunden ist. Mit der vom Bildteiler festgehaltenen Position des Sterns relativ zur Strichplatte kann der genaue Zeitpunkt und die tatsächliche Zenitdistanz des Sterndurchgangs durch den Meridian angegeben werden (KOVALEVSKY, 1994, 150-154).

- *CCD-Mikrometer*

Wie in vielen anderen Bereichen der Technik hat der Einsatz von Charged Coupled Devices – CCD) (Beynon/Lamb, 1980) auch im astrometrischen und astrogeodätischen Instrumentenbau neue Möglichkeiten der Datenerfassung eröffnet. Ein CCD ist eine komplexe, auf einem Halbleiter aufgebrachte integrierte Schaltung, die in der Lage ist, ein vorgegebenes optisches Bild in ein kongruentes, durch elektrische Ladungen definiertes Bild umzusetzen. Ihr Kernstück ist ein Bildsensor mit zahlreichen gleichabständig rasterförmig angeordneten Bildpunkten. Je nach CCD-Modell sind 30000 bis 4000000 Bildpunkte (Pixel) auf einer Fläche von wenigen Quadratzentimetern untergebracht. In den einzelnen Pixeln erzeugt das einfallende Licht proportional zur Lichtmenge freie Ladungsträger (Elektronen), die in einem vorgegebenen Zeittakt ausgelesen, elektronisch analysiert und analog oder digital weiterverarbeitet werden können. Bei kontinuierlichem Lichteinfall und quasikontinuierlichem Abruf der Ladungen entsteht eine Folge von Signalen, die durch ihre geometrische und zeitliche Zuordnung die Rekonstruktion des aufgenommenen Bewegungsvorgangs ermöglichen. CCD sind wesentlich lichtempfindlicher als SEV oder photographische Schichten, so dass bei der Nutzung eines CCD als Bildsensor auch extrem lichtschwache Sterne in das Beobachtungsprogramm aufgenommen werden können.

Das CCD kann wie die oben dargestellten Systeme auf einem beweglichen Wagen montiert und in ähnlicher Funktion wie der elektronische Bildteiler betrieben werden: Das Messergebnis ist auch hier eine Zeitreihe, die die momentane Lage des Sterns relativ zum Bezugsrahmen des Wagens wiedergibt.

Eine bessere, weil mit geringerem mechanischen Aufwand verbundene Lösung kann mit dem festen Einbau des CCD in die Bildebene des Fernrohrs erreicht werden. Bei fixierter Fernrohreinstellung zieht das Bild des Sterns über das CCD. Dabei werden die Koordinaten der Sternspur im CCD-Bezugssystem festgehalten und als Zeitreihe an den Rechner weitergegeben, der den Zeitpunkt und die Zenitdistanz eines Sterndurchgangs durch eine definierte CCD-Spalte berechnet (SCHIRMER, 1994).

2.4.4 Zenitkammern

Die Beobachtung von Sterndurchgängen in der unmittelbaren Nachbarschaft des Zenits hat im Vergleich mit anderen Beobachtungsszenarien den Vorteil, dass der im allgemeinen nur unsicher erfassbare Refraktionseinfluss weitgehend verschwindet. Diesen Vorteil machten sich schon Ende des 17. und im frühen 18. Jahrhundert JEAN PICARD, GIOVANNI DOMENICO und JACQUES CASSINI, CHARLES MARIE DE LA CONDAMINE und PIERRE BOUGUER u.a. zunutze, die im Rahmen berühmter Kampagnen zur Bestim-

mung der Erdfigur Zenitteleskope (»Zenitsektoren«) einsetzten. Auch die Entdeckung der Aberration und der Nutation durch JAMES BRADLEY erfolgte mit derartigen Teleskopen.

Photographische Zenitfernrohre (PZT: Photographic Zenith Tubes) wurden erstmals um die Jahrhundertwende von STOLZE (1893), RUNGE (1893), SCHNAUDER (1900) und SCHWARZSCHILD (1903) vorgeschlagen. Seit jenen Anfängen wurde der Gerätetyp in zahlreichen Varianten gebaut und von vielen astronomischen Observatorien zur Bestimmung der Zeit und der geographischen Breite eingesetzt (ENSLIN, 1964; THOMAS, 1964; ENGELBRECHT, 1966; PAUSCHER, 1968; RAMSAYER, 1970, 243-247). Geodätische Anwendungen sind durch die Entwicklung von tragbaren Zenitkammern möglich geworden (MARKOWITZ, 1969; GESSLER/PILOWSKI, 1972; GESSLER, 1975; GESSLER/SEEBER, 1975; BÜRKI/KAHLE/SCHMID, 1983; CHESI, 1984; WISSEL, 1982; PILOWSKI, 1985; SEEBER/TORGE, 1985). Die den letzten zehn Jahren ist die photographische Aufnahmetechnik von elektronischen Verfahren (SEV, CCD) abgelöst worden (DITTRICH/FISCHER, 1990; FOSU, 1999).

Photographische Zenitkammer

Eine photographische Zenitkammer (PZK) besteht im einfachsten Fall aus einem Fernrohr mit einem in der Bildebene des Objektivs fest installierten Bildrahmen und einem Lotsensor. Das Fernrohr ist über eine Stehachse drehbar mit einem Instrumentenunterbau verbunden. Stehachse und Fernrohrachse sind annähernd gleichgerichtet. Der vorerwähnte Bildrahmen dient als Halterung von Photoplatten. Er ist mit Randmarkierungen versehen, die bei der Belichtung zusammen mit der aufgenommenen Szene auf die Platte kopiert werden. Dadurch ist wie bei einer photogrammetrischen Messkammer eine Rekonstruktion der durch die Photographie festgehaltenen Perspektive des angezielten Ausschnitts des Sternhimmels möglich. Fest mit dem Fernrohr verbunden sind Lotrichtungssensoren (Libellen, Quecksilberhorizont im Strahlengang), mit deren Hilfe die Steh- und die Zielachse des Fernrohrs in die Lotrichtung gestellt werden können. Die Zeitintervalle der Öffnung des Objektivs werden mit einer Uhr festgehalten, wodurch die Lage des Ausschnitts der abgelichteten Sternspur zeitlich zugeordnet wird. Durch Ausmessung der Messbilder in einem Komparator werden die momentanen Sternkoordinaten im Bezugssystem der Messkammer gewonnen. Da der Aufnahmezeitpunkt festgehalten wird, können für diesen Zeitpunkt die Sternkoordinaten auch im System der Apparent Places of Fundamental Stars (die auf dem Fundamentalkatalog FK5 basieren) und im erdfesten, am Greenwich-Meridian orientierten äquatorialen Bezugssystem berechnet werden. Durch Einpassung des aus den Bildkoordinaten abgeleiteten Strahlenbündels in das durch die Katalogkoordinaten definierte, die durch Drehung des lotorientierten Fernrohrsystems in das äquatoriale Bezugssystem bewirkt werden kann, findet man die gesuchte geographische Länge und Breite des Standortes.

CCD-Zenitkammern

In den Bemühungen, Zenitbeobachtungen zu automatisieren, wurden zunächst nach dem gleichen Prinzip wie in Verbindung mit Durchgangsinstrumenten, Meridiankreisen und Prismenastrolabien photoelektrische Registrierverfahren entwickelt (MEINIG/JOCHMANN, 1979; NGYEN TRI LONG, 1979). Diese Entwicklungslinie wurde, wie das Verfahren der photographischen Registrierung, in jüngster Zeit von der CCD-Technologie abgelöst, die der Astrometrie und der Geodätischen Astronomie vielfältige neue Möglichkeiten eröffnet hat. Hervorzuheben ist vor allem die hohe Lichtempfindlichkeit der CCD-Sensoren und ihre hervorragende Eignung als Bausteine in vollautomatischen ablaufenden Prozessen der digitalen Bildverarbeitung (BEYNON/LAMB, 1980).

Eine CCD-Zenitkammer unterscheidet sich von einer photographischen Zenitkammer im wesentlichen nur in der Technologie, mit der die aufgenommene Szene des zenitnahen Himmels festgehalten wird (BRETTERBAUER, 1997; FOSU, 1995). Gegenüber der Photographie hat die CCD-Aufnahme den entscheidenden Vorteil, dass alle Positionsangaben bereits bei der Aufnahme in digitaler Form anfallen und sofort weiterverarbeitet werden können. Abgesehen von den Auswirkungen kleiner, im Augenblick der Registrierung noch nicht zugänglicher Korrekturen der prädierten Erdorientierungsparameter ist es daher mit einer CCD-Zenitkammer in Verbindung mit geeigneter Software im Prinzip möglich, die Lotrichtung und die azimutale Ausrichtung der Kamera im Beobachtungsstandort in »Echtzeit« anzugeben.

3 Schlussfolgerungen und Ausblick

Eine Kette ist nur so stark wie ihr schwächstes Glied. Die Analyse der unter diesem Aspekt die in 2.1 eingeführten (symbolischen) Beobachtungsgleichung

$$\phi = 90^\circ - \alpha + EO\{T\} - z\{T\},$$

deren Bestandteile

- » ϕ «: gesuchte Lotrichtung in einem äquatorialen terrestrischen Bezugssystem
- » α «: Sternkoordinaten in einem zälestischen Bezugssystem,
- » $EO\{T\}$ «: Erdorientierungsparameter und
- » $z\{T\}$ «: erdgebundene lotorientierte Sternbeobachtungen

a.a.O. vor dem Hintergrund der Entwicklung verbesserter theoretischer Grundlagen und der Automatisierung der Beobachtungsinstrumente diskutiert wurden, führte zu folgenden Erkenntnissen:

- Zu T : Der Parameter »Zeit« (T), der die momentanen Werte von EO und z bestimmt, wird heute von hochgenauen Atomuhren erzeugt. Im Verbund der nationalen und internationalen Zeitdienste und über zahlreiche Kommunikationskanäle ist dieser Parameter jederzeit und weltweit mit ms-Genauigkeit zugänglich. EO und z können so in einem identischen Zeitrahmen mit einer für die Aufgaben der GA ausreichenden Genauigkeit aufeinander bezogen werden.
- Zu » α «: Als Ergebnis der HIPPARCOS-Satellitenmission steht mit dem HIPPARCOS- und dem TYCHO-Katalog heute ein zälestischer Bezugsrahmen zur Verfügung, der weder hinsichtlich der Zahl der Sterne noch unter dem Kriterium der Genauigkeit der Sternkoordinaten α Wünsche offen läßt.
- Zu » $EO\{T\}$ «: Die laufende Beobachtung der Erdrotation durch den Internationalen Erdrotationsdienst (*IERS*) liefert die Erdrotationsparameter EO mit einer Genauigkeit, die bei der Übertragung der Sternkoordinaten α auf einen erdfesten Bezugsrahmen die hohen Standards des HIPPARCOS- und des TYCHO-Katalogs auch für terrestrische Beobachtungen aufrecht erhält.
- Zu » $z\{T\}$ «: Die erdgebundenen lotorientierten Sternbeobachtungen sind zweifellos das schwächste Glied in der Kette. Dafür sind vor allem die mit der Erfassung der Refraktion verbundene Unsicherheit sowie Unzulänglichkeiten der Gerätetechnik verantwortlich. Die durch nicht erfaßbare Refraktionseinflüsse verursachten Verfälschungen der Beobachtungen können durch Zenitbeobachtungen weitgehend minimiert werden. Vor diesem Hintergrund lassen Aufnahmen mit Zenitrohren und Zenitkammern bestmögliche Ergebnisse erwarten. Aus heutiger Sicht bieten mit elektronischen Libellen ausgerüstete CCD-Zenitkammern die besten Voraussetzungen, einen vollautomatisierten Messablauf zu realisieren, der bei der CCD-Aufnahme beginnt und – abgesehen von kleinen, in der Regel erst nach einigen Tagen zugänglichen Korrekturen der Erdorientierung – schon im Feld die Lotrichtungen der Standorte liefert.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

- ▶ Geodätische-astronomisch bestimmte Lotrichtungen sind zuverlässige und hochgenaue Observable zur Bestimmung eines hochaufgelösten Geoids. Ein solches erweitert das Potential der Satellitengeodäsie um die Höhenkomponente.
- ▶ Mit CCD-Zenitkammern können Messung und Auswertung vollautomatisiert werden: die Bestimmung der Lotrichtung in einem erdfesten Bezugssystem dauert nur noch wenige Minuten. Die Messung von zehn und mehr Lotrichtungen pro Beobachtungsnacht erscheint realistisch. Die Technologie ist hinsichtlich ihrer theoretischen und technischen Grundlagen (Prototypen) gelöst. Weitere Entwicklungsarbeiten auf industrieller Grundlage sind jedoch noch erforderlich.

4 Literatur

- BARTELS, A., 1961: *Erprobung des Zeiss Ni2-Astrolabiums für astronomisch-geodätische Ortsbestimmungen*. Zeitschrift für Vermessungswesen 86, 394-397
- BAŠIĆ, T., 1989: *Untersuchungen zur regionalen Geoidbestimmung mit »dm« Genauigkeit*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover 157
- BAUERSIMA, I., 1989: *Die Satellitengeodäsie im Dienste der globalen Geodynamik*. Geodätisch geophysikalische Arbeiten in der Schweiz 39, 37-48, Zürich
- BERNAUER, I., GEIGER, A., 1986: *Lokale Schwerefeldbestimmung und gravimetrische Modellrechnungen im Satelliten (GPS)-Testnetz »Turtmann« (Wallis)*. Geod Geophys Arb Schweiz, Band 38, Zürich
- BIALAS, V., 1972: *Der Streit um die Figur der Erde*. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften E14, München
- BEYNON, J.D.E., LAMB, D.R., 1980: *Charge-coupled devices and their applications*. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, London, New York, ...Toronto
- BOEDECKER, G., 1975: *Astrogravimetric Levelling with Direct Regard to Topography*. In: *Beiträge aus der Bundesrepublik Deutschland zur Vorlage bei der XVI. Generalversammlung der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik, Grenoble 1975*. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften B213, 3-11, München
- BOMFORD, G., 1972: *The Astrogeodetic Geoid in Europe and Connected Areas 1971*. Travaux de l'Association Internationale de Géodésie 24, 357-370, Paris
- BOZORGZADEH, GH., 1977: *Die genaue Bestimmung von Lotabweichungen mit dem Ni2-Astrolabium*. Dissertation Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe
- BRADLEY, J., 1728: *A letter from the Referend Mr. James Bradley Savilian Professor of Astronomy at Oxford, and F.R.S. to Dr. Edmond Halley Astronom. Reg. & c. giving an Account of the new discovered motion of the fix'd Stars*. Philosophical Transactions 34 (406), 637-661
- BRADLEY, J., 1748: *A Letter to the Right honourable George Earl of Macclesfield concerning an apparent Motion observed in some of the fixed Stars*. Philosophical Transactions 45 (485), 1-43
- BRETTERBAUER, K., GERSTBACH, G., 1983: *Die astrogeodätischen Arbeiten der TU Wien*. In: *Das Geoid in Österreich*. Österreichische Kommission für die Internationale Erdmessung, Neue Folge 3, 61-72, Graz
- BRETTERBAUER, K., 1997: *Über die Reaktivierung klassischer Methoden*. geo-News 3/97
- BROWN, E.W., 1896: *An Introductory Treatise on the Lunar Theory*. Cambridge University Press. Unveränderter Nachdruck 1960 durch Dover Publications Inc., New York
- BROWN, E.W., 1899-1910: *Theory of the Motion of the Moon; Containing a New Calculation of the Expressions for the Coordinates of the Moon in Terms of the Time*. Memoires of the Royal Astronomical Society 53, S.39-116; 53, S.163-202 (1899); 54, S.1-63 (1904); 57, S.51-145 (1908); 59, S.1-103 (1910)
- BÜRKI, B., KAHLE, H.-G., SCHMID, H.H., 1983: *Das neue Zenitkamera-Messsystem am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich*. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 81, 349-354
- BUCHAR, E., 1951: *Tižnicové odchylky a geoid v ČSR*. V decko-technické nakladatelství, Praha
- CAMPBELL, J., 1971: *Eine Erweiterung der Theorie des astronomischen Nivellements bei Einbeziehung von Schweremessungen*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover 49, Hannover
- CASPARY, W., 1987: *Inertialplattformen: Messprinzip und geodätische Nutzung*. In: CASPARY, W., HEIN, G., SCHÖDLBAUER, A. (Herausgeber): *Beiträge zur Inertialgeodäsie*. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen Universität der Bundeswehr München 22, 7-22
- CHANDLER, S.C., 1891/1892: *On the Variation of Latitude*. Astronomical Journal 11, S.59-61, 65-70, 75-79, 83-86, 1891, und Astron J 12, S.17-22, 65-72, 97-102, 1892
- CHESI, G., 1984: *Entwicklung einer tragbaren Zenitkammer und ihr Einsatz im 47. Parallel*. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften C287, München
- CIMBÁLNÍK, M., 1953: *Příspěvek ke studiu geoidu na území ČSR*. (Beitrag zu einer Studie des Geoids auf dem Gebiet der Tschechoslowakei). Zeměměřičství 41, 104-109

- ČOLIĆ, K., BAŠIĆ, T., PETROVIĆ, S., PRIBIČEVIĆ, B., RADKAJEC, M., SÜNKEL, H., KÜHTREIBER, N., 1992: *New Geoid Solution for Slovenia and a Part of Croatia*. In: Holota, P., Vermeer, M. (Herausgeber), 1992: *First Continental Workshop on the Geoid in Europe: Towards a Precise Pan-European Reference Geoid for the Nineties*. Prague, May 11-14, 1992, 158-165
- ČOLIĆ, K., PRIBIČEVIĆ, B., ŠVEHLA, D., 1998: *First cm-Geoid in Republic of Croatia – Capital Zagreb Pilot*. In VERMEER, M., ÁDÁM, J (Herausgeber): *Proceeding Second Continental Workshop on the Geoid in Europe; Reports of the Finnish Geodetic Institute 98:4*, 245-249, Masala
- DANJON, A., 1969: *The Impersonal Astrolabe*. In: KUIPER, G.P., MIDDLEHURST, B.M. (Herausgeber), 1969: *Telescopes*. The University of Chicago Press, Chicago, 115-137
- DAXINGER, W., 1996: *Astrogravimetrische Geoidbestimmung für Ingenieurprojekte*. Geowissenschaftliche Mitteilungen Studienrichtung Vermessungswesen der TU Wien Nr. 45
- DEICHL, K., 1975: *Zur Messung mit Pendelaströlabien und ihrer Auswertung*. Zeitschrift für Vermessungswesen 100, 499-509
- DENKER, H., 1988: *Hochauflösende regionale Schwerefeldbestimmung mit gravimetrischen und topographischen Daten*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover 156, Hannover
- DENKER, H., 1989: *A New Gravimetric Quasigeoid for the Federal Republic of Germany*. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften B291, München
- DENKER, H., TORGE, W., 1992: *Recent Developments of the European Geoid Project*. In: HOLOTA, P., VERMEER, M. (Herausgeber), 1992: *First Continental Workshop on the Geoid in Europe: Towards a Precise Pan-European Reference Geoid for the Nineties*. Prague, May 11-14, 1992, 31-39
- DITTRICH, J., FISCHER, H., 1990: *Astrometrisch-optische Bestimmung der Erdrotationsparameter mit einem neuen Photoelektrischen Zenitrohr*. Feinwerktechnik 38, 313-315
- DMA - Defense Mapping Agency, 1987: *Supplement to Department of Defense World Geodetic System 1984. Technical Report Part II: Parameters, Formulas, and Graphics for the Practical Application of the WGS 84*. DMA, Washington
- ENGELBRECHT, J., 1966: *Das Photo-Zenit-Teleskop (PZT) der Sternwarte Babelsberg (Konstruktion und Funktion)*. Feinwerktechnik 15, 8-12
- ENSLIN, H., 1964: *Der Breitendienst des Deutschen Hydrographischen Instituts*. Zeitschrift für Vermessungswesen 89, 266-279
- ERKER, E., 1983: *Das Geoid in Österreich – Berechnungen des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen*. In: Österreichische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften für die internationale Erdmessung (Herausgeber), 1983: *Das Geoid in Österreich*. Geodätische Arbeiten Österreichs für die Internationale Erdmessung, Neue Folge III, 1983, 89-115
- ERKER, E., HOFMANN-WELLENHOF, B., MORITZ, H., SÜNKEL, H., 1995: *Austrian Geoid 2000*. Presented Paper IUGG General Assembly XX, Boulder, USA
- ERKER, E., HOFMANN-WELLENHOF, B., MORITZ, H., SÜNKEL, H., 1996: *Austrian Geoid 2000*. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Geoinformatik, 289-293
- FEISSEL, M., MIGNARD, F., 1998: *The adoption of ICRS on 1 January 1998: Meaning and Consequences*. Astron Astr 331, L33-L36
- FORSBERG, R., MADSEN, F., 1990: *High-Precision Geoid Heights for GPS Levelling*. Paper GPS-90 Symposium, Ottawa
- FORTES, L.P., HOYER, M.J., SUBIZA, W.H., DREWES, H., 1995: *The SIRGAS project*. IGS 1994 Annual Report, 247-250, Pasadena, California
- FOSU, C., 1999: *Astrogeodetic Levelling by the Combination of GPS and CCD Zenith Camera*. Schr Uni Bw München 62, Neubiberg
- GAUSS, C.FR., 1808: *Über eine Aufgabe der sphärischen Astronomie*. Zachs Monatliche Correspondenz October 1808. Außerdem in: *Werke* 6, 37-49, Georg Olms Verlag, Hildesheim, New York, 1973
- GEIGER, A., KAHLE, H.-G., 1986: *Gravimetrisches Geoid in der Schweiz*. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 84, 311-323
- GERSTBACH, G., 1990: *Ein Weg zum Zentimeter-Geoid in Österreich – Wie GPS und »Astro-geologisches Geoid« das Nivellement ersetzen kann*. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie 78, 14-38

- GERSTBACH, B., 1996/1: *CCD und Geodätische Astronomie – Zur Nutzbarkeit von CCD für Lot- und Azimutmessungen*.
Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Geoinformatik 84, S.63-68, 1996/1
- GERSTBACH, B., 1996/2: *The Astro-Geodetic Use of CCD for Gravity Field Refinement*.
Paper EGS XXI Gen. Ass. Den Haag, 1996/2
- GERSTBACH, G., 1997: *How to Get an European Centimeter Geoid (»Astro-geological Geoid«)*.
- GESSLER, J., 1975: *Entwicklung und Erprobung einer transportablen Zenitkamera für astronomisch-geodätische Ortsbestimmungen*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover 60
- GESSLER, J., PILOWSKY, K., 1972: *Erste Ergebnisse mit den transportablen Zenitkameras der astronomisch-geodätischen Station Hannover*. Zeitschrift für Vermessungswesen 97, 372
- GESSLER, J., SEEGER, G., 1975: *Latitude and Longitude Determination with a Transportable Zenith Camera*. In: DEUTSCHE GEODÄTISCHE BEI DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN, 1975: *Beiträge aus der Bundesrepublik Deutschland zur Vorlage bei der XVI. Generalversammlung der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik, Grenoble 1975*. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften B213, 23-32, München
- GRANSER, H., HÖSCH, K., STEINHAUSER, P., ZYCH, D., 1983: *Über das Dichtemodell in Österreich*.
Geod Arb Österr, Neue Folge, Band III, 159-182, Graz
- GRASSHOFF, G., 1990: *The History of Ptolemy's Star Catalogue*.
Springer Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, London, Paris, Tokio
- GROTEN, E., 2000: *Die Fundamentalkonstanten in der Geodäsie*.
Zeitschrift für Vermessungswesen 125, 1-3
- GURTNER, W., 1978: *Das Geoid in der Schweiz*. Mitt Inst Geod Ph ETH Zürich 20
- GURTNER, W., BÜRKI, B., 1987: *Deviation of the Vertical*. In: TURNER, S. (Editor), 1987: CAS Cern Accelerator School, Applied Geodesy for Particle Accelerators, 14.-18.04.1986, Geneva, 105-118
- HAITZMANN, H., 1983: *Ein digitales Höhenmodell von Österreich*.
Geod Arb Österr, Neue Folge, Band III, 147-152, Graz
- HEHL, KL., 1992: *Bestimmung von Beschleunigungen auf einem bewegten Träger durch GPS und digitale Filterung*. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen Universität der Bundeswehr München 43, Neubiberg
- HEIN, G., 1978: *Bestimmung der Schwereanomalien, Lotabweichungen und des Geoids im Oberrheingraben aus zweiten Ableitungen des Schwerepotentials*. Beiträge zur astronomischen Geodäsie und Geodynamik, Institut für Physikalische Geodäsie der Technischen Hochschule Darmstadt, Darmstadt
- HEINEKE, U., TORGE, W., 1979: *Determination of a Fine Structured Astrogeodetic Geoid in a Tidal Flat Area of the North Sea*. Marine Geodesy 2, 201-214
- HEISKANEN, W.A., MORITZ, H., 1967: *Physical Geodesy*.
W.H. Freeman and Company, San Francisco and London
- HEITZ, S., 1969: *Eine astronomisch-geodätische Geoidbestimmung für Westdeutschland*.
Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften B167, Frankfurt/M.
- HELMER, L., MORRISON, L.V., 1985: *The Carlsberg Automatic Circle*. Vistas in Astronomy 28, 505-518
- HELMERT, FR.R., 1880; 1884 (2 Teile): *Die mathematischen und physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie*. B.G. Teubner, Leipzig
- HUGHES, J.A., ROBINSON, M.D., GAUSS, F.S., STONE, R.C., 1986: *Astrometric Techniques*. In: EICHHORN, H.K., LEACOCK, R.J. (Herausgeber), 1986: *Proceedings IAU Symposium 109*. Reidel Publ. Co., Dordrecht
- HWANG, CH., 1989: *High Precision Gravity Anomaly and Sea Surface Height Estimation from GEOS-3/SEASAT Satellite Altimeter Data*. Reports of the Department of Geodetic Science and Surveying 399, The Ohio State University, Columbus
- IGP (INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND PHOTOGRAMMETRIE) 1989: *User Manual for the on-line-measuring and computation program of astronomical latitudes and longitudes*. ETH-Zürich
- JOECKEL, R., 1975: *Untersuchung eines astronomischen Theodolits mit automatischer Fernrohrnachführung durch Schrittmotoren*. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften C215, München

- JOOS, D.K., 1987: *Inertialsensoren und Inertialsysteme*. In: CASPARY, W., HEIN, G., SCHÖDLBAUER, A. (Herausgeber): *Beiträge zur Inertialgeodäsie*. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen Universität der Bundeswehr München 22, 23-44
- KAPLAN, G.H., 1995: *Determining the Position and Motion of a Vessel from Celestial Observations*. Navigation 42, 631-648
- KEPLER, J., 1609: *Astronomia nova*. Prag. Herausgeber einer deutschen Übersetzung: CASPAR, M., 1990: *Neue Astronomie*. R. Oldenbourg Verlag, München
- KEPLER, J., 1619: *Harmonia mundi*. G. Tampach, Frankfurt/M. Herausgeber einer deutschen Übersetzung: CASPAR, M., 1973: *Weltharmonik*. R. Oldenbourg Verlag, München
- KLINGELÉ, E., HALLIDAY, M., COCARD, M., KAHLE, H.-G., 1995: *Airborne Gravimetric Survey of Switzerland*. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 93, 248-253
- KNEIßL, M., 1953: *Die Genauigkeit der Winkel und astronomischen Azimute im Zentraleuropäischen Hauptnetz*. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften A2, München
- KNEIßL, M., 1958: *Mathematische Geodäsie (Landesvermessung)*. In: Jordan /Eggert /Kneissl (Herausgeber), 1958: *Handbuch der Vermessungskunde*. Band IV, J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- KOVALEVSKY, J., 1994: *Modern Astrometry*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg
- KOVALEVSKY, J., MUELLER, I.I., KOLACZEK, B. (Herausgeber), 1989: *Reference Frames in Astronomy and Geophysics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London
- KOVALEVSKY, J., LINDGREEN, L., PERRYMAN, M.A.C., HEMENWAY, P.D., JOHNSTON, K.J., KISLYUK, V.S., LESTRADE, J.F., MORRISON, L.V., PLATAIS, I., RÖSER, S., SCHILBACH, E., TUCHOLKE, H.J., VONDRAK, J., ARIAS, F., GONTIER, A.M., ARENOU, F., BROSCHE, P., FLORKOWSKI, D.R., GARINGTON, S.T., PRESTON, R.A., RON, C., RYBKA, S.P., SCHOLZ, R.D., ZACHARIAS, N., 1997: *The Hipparcos Catalogue as a realisation of the extragalactic reference system*. Astron Astrophys 323, 620-633
- KRACK, KL., 1993: *Einrichtung eines Grundlagenternetzes mit Hilfe des Global Positioning System in Ruanda*. In: INSTITUT FÜR GEODÄSIE (Herausgeber), 1993: *Das Global Positioning System im praktischen Einsatz der Landes- und Ingenieurvermessung – Beiträge zum Geodätischen Seminar* 12.-14. Mai 1993. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen Universität der Bundeswehr München 45, Neubiberg, 139-157
- LECHNER, W., 1987: *Azimuthbestimmung mit Inertialsystemen*. In: CASPARY, W., HEIN, G., SCHÖDLBAUER, A. (Herausgeber): *Beiträge zur Inertialgeodäsie*. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen Universität der Bundeswehr München, 22, 237-259
- LELGEMANN, D., 1978: *Ein Verfahren zur astro-gravimetrischen Geoidbestimmung*. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften C247, Frankfurt/M.
- LELGEMANN, D., EHLERT, D., HAUCK, H., 1981: *Eine astro-gravimetrische Berechnung des Quasigeoids für die Bundesrepublik Deutschland*. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften A92, Frankfurt/M.
- LEVALLOIS, J.J., 1978: *Sur le calcul des géoïdes astro-géodésiques*. Bolletino di Geodesia e Scienze Affine 37, 403-421
- LINDSTROT, W., 1999: *Das deutsche Referenzsystem 1991 – DREF 91*. Mitteilungen des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie 9
- MADSEN, F., TSCHERNING, C.C., 1990: *The Use of Height Differences Determined by the GPS in the Construction Process of the Fixed Link Across the Great Belt*. Paper, FIG XIX International Congress, Helsinki
- MARKOWITZ, W., 1969: *The Photographic Zenith Tube and the Dual-Rate Moon-Position Camera*. In: KUIPER, G.P., MIDDLEHURST, B.M. (Herausgeber), 1969, 88-114: *Telescopes*. The University of Chicago Press, Chicago, London
- MARTI, U., KAHLE, H.-G., 1995: *Die neue Geoidbestimmung in der Schweiz: Gegenwärtiger Stand und Genauigkeitsuntersuchungen*. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 93, 241-247
- MELBOURNE, W.G., 1980: *Very-long-baseline radio interferometry*. In: WILKINS, G.A. (Herausgeber), 1980: *Project MERIT*. Royal Greenwich Observatory, Herstmonceux, und Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt/M., 1980, 37-53

- MÖNICKE, H.-J., 1981: *Interpretation astronomisch-geodätischer Lotabweichungen im Oberrheingraben*. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften C265, München
- MORITZ, H., 1980: *Geodetic Reference System 1980*. Bulletin Geodesique 54(3), 395-405
- MUELLER, I., 1969: *Spherical and Practical Astronomy as Applied to Geodesy*. Frederick Ungar Publishing Co., New York
- NEWCOMB, S., 1891: *On the Periodic Variation of Latitude and the Observations with the Washington Prime-Vertical Transit*. Astronomical Journal 11 (No.251), 81-82
- NEWCOMB, S., 1892/1: *On the Dynamics of the Earth's Rotation, with Respect to the Periodic Variations of Latitude*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 52, 336-341
- NEWCOMB, S., 1892/2: *Remarks on Mr. Chandler's Law of Variation of Terrestrial Latitudes*. Astronomical Journal (271) 12, 49-50
- NEWTON, I., 1686: *Philosophiae naturalis principia mathematica*. London
Herausgeber einer deutschen Übersetzung: Wolfers, J.Ph., 1872: *Sir Isaac Newton's Mathematische Principien der Naturlehre*. Verlag Robert Oppenheim, Berlin
Englische Übersetzung: CAJORI, F., 1934: *Principia*. University of California Press, Berkeley
- PAUSCHER, H., 1968: *Wissenswertes über das Photo-Zenit-Teleskop*. Die Sterne 44, 198-206
- PERRIER, G., 1949: *Wie der Mensch die Erde gemessen und gewogen hat*. Meisenbach Verlag, Bamberg
- PICK, M., PÍCHA, J., VYSKOČIL, V., 1973: *Theory of the Earth's Gravity Field*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, London, New York
- PILOWSKI, K., 1985: *Transportable Zenitkameras – Reduktion, Konstruktion, Anwendung*. Veröffentlichung der Astronomischen Station der Universität Hannover 16
- PLONER, M., 1996: *CCD-Astrometrie von Objekten des geostationären Ringes*. Geowiss Mitt TU Wien 46, Wien
- POTTHOFF, H., 1993: *Method and device for photographic observation of geosynchronous satellites*. Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Dresden 42, 93-95
- RAMSAYER, K., 1962: *Automatische Sternnachführung für astronomischen Theodolit*. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften B81, München
- RAMSAYER, K., 1970: *Geodätische Astronomie*. JORDAN /EGGERT /KNEISSEL (Herausgeber), 1970: *Handbuch der Vermessungskunde*, Band II a. J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- REIGBER, CHR., 1969: *Zur Bestimmung des Gravitationsfeldes der Erde aus Satellitenbeobachtungen*. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften C137, München
- REIGBER, CHR., 1982: *Figur- und Feldparameterbestimmung*. Abschlußbericht zum Teilprojekt B 3. In: Schneider, M.: (Herausgeber), 1982: *Sonderforschungsbereich 78 Satellitengeodäsie der Technischen Universität München – Abschlußberichte zu den Teilprojekten*. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften B261, München
- ROBBINS, A.R., 1977: *Geodetic Astronomy in the Next Decade*. Survey Review 24, 99-108
- RÖDDE, A., 1970: *Simultanbestimmung der Lotabweichungskomponenten ξ und η mit dem Prismenastrolabium*. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften B197, Frankfurt/M.
- ROTHACHER, M., BEUTLER, G., GURTNER, W., GEIGER, A., KAHLE, H.-G., SCHNEIDER, D., 1986: *The 1985 Swiss GPS-Campaign*. Proceedings of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, April 28 - May 2, 1986, University of Texas at Austin, Vol. 2, 979-991, Austin
- RUSS, D., 1983: *Über das digitale Geländemodell in Österreich*. Geod Arb Österreich, Neue Folge III, 153-157, Graz
- RUMMEL, R., 1991: *On the Principle of ARISTOTELES*. In: *The Solid Earth Mission ARISTOTELES*. Proceedings of an International Workshop, Anacapri, Italy, 23-24 September 1991, 11-15
- RUNGE, C., 1893: *Die Bestimmung der geographischen Länge auf photographischem Wege*. Zeitschrift für Vermessungswesen 22, 417-423
- SCHEIBE, A., ADELSBERGER, U., 1936: *Schwankungen der astronomischen Tageslänge und der astronomischen Zeitbestimmung nach den Quarzuhren der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt*. Physik in unserer Zeit 37, 185-203

- SCHIRMER, W., 1994: *Universaltheodolit und CCD-Kamera – ein unpersönliches Meßsystem für astronomisch-geodätische Beobachtungen*. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften C427, München
- SCHMIDT, R., 1995: *Referenz- und Koordinatensysteme in der deutschen Grundlagenvermessung*. Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungsdienst Nordrhein-Westfalen 28, 23-67
- SCHNAUDER, M., 1900: *Geographische Ortsbestimmung mit der Zenith-Camera*. Astronomische Nachrichten 154, 133-138
- SCHNEIDER, D., GUBLER, E., WIGET, A., 1996: *Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz »LV95« Teil 1: Vorgeschichte, Konzept, Projektorganisation und Planung*. Berichte aus dem (schweizerischen) Bundesamt für Landestopographie 6
- SCHÖDLBAUER, A., 1981: *Rechenformeln und Rechenbeispiele zur Landesvermessung*. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, Teil 1
- SCHÖDLBAUER, A., 1985/1: *Geodätisch nutzbare Trägheitsplattformen und die gegenseitigen Beziehungen der ihnen zugeordneten Koordinatensysteme*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 92, 510-524
- SCHÖDLBAUER, A., 1985/2: *Inertial Survey Systems and their Relevant Coordinate Systems*. In: WELSCH, W.M., LAPINE, L.A. (Herausgeber), 1985, *Proceedings Inertial, Doppler and GPS Measurements for National and Engineering Surveys*. Schriftenreihe Universitärer Studiengang Vermessungswesen Universität der Bundeswehr München 20-1, 89-111
- SCHÖDLBAUER, A., 1987: *Geodätische Positionsbestimmung mit Inertialsystemen auf Bezugsellipsoiden*. In: CASPARY, W., HEIN, G., SCHÖDLBAUER, A. (Herausgeber): *Beiträge zur Inertialgeodäsie*. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen Universität der Bundeswehr München 22, 69-138
- SCHÖDLBAUER, A., 1990/1: *Einsatz des Global Positioning System zur Verdichtung des amtlichen trigonometrischen Festpunktfeldes*. In: SCHÖDLBAUER (Herausgeber), 1990, *Moderne Verfahren der Landesvermessung*. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen Universität der Bundeswehr München 38-1, Neubiberg, 67-85
- SCHÖDLBAUER, A., 1990/2: *Funktionsprinzipien automatisierter Vermessungskreisel*. In: SCHÖDLBAUER (Herausgeber), 1990, *Moderne Verfahren der Landesvermessung*. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen Universität der Bundeswehr München 38-2, Neubiberg, 443-469
- SCHÖDLBAUER, A., 1994: *Einrichtung eines grundlegenden geodätischen Festpunktfeldes in Ruanda*. Schriftenreihe des Deutschen Vereins für Vermessungswesen 12, 75-84
- SCHÖDLBAUER, A., HEISTER, H., KRACK, KL., SCHERER, B., 1992: *Höhenübertragung über den Großen Belt (östlicher Kanal) unter Nutzung des Global Positioning system (GPS) in Verbindung mit lokalen Nivellements, Messungen von Zenitdistanzen und astronomischen Azimut- und Breitenbestimmungen (GPS-Nivellement)*. In: MATTHIAS, H. J., GRÜN, A. (Herausgeber), 1992: *Ingenieurvermessung 92 – Beiträge zum XI. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich, 21.-25.9.1992*. S.IV/1-IV 1/14, Ferd. Dümmler Verlag, Bonn
- SCHÖDLBAUER, A., GLASMACHER, H., HEISTER, H., KRACK, KL., SCHERER, B., 1993: *Height Transfer Across the Storebælt (Eastern Channel) Using Geometric Levelling, Trigonometric Heighting and Astronomic Methodes in Combination with GPS (GPS Levelling)*. In: LINKWITZ, K., EISELE, V., MÖNICKE, H.-J. (Herausgeber), 1993: *Applications of Geodesy to Engineering*. Symposium No.108 der International Association of Geodesy (IAG), Stuttgart, 13.-17.05.1991, 290-302, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg etc.
- SCHOTT, P., ZICK, W., 1995: *Photoelektrische Registrierung von Sterndurchgängen – eine für den Feldeinsatz geeignete Entwicklung*. Festschrift für Heinz Draheim zum 80. Geburtstag, Eugen Kuntz zum 70. Geburtstag, Herman Mälzer zum 70. Geburtstag, Veröff Geod Inst U Karlsruhe, 235-241
- SCHWARZSCHILD, K., 1903: *Über photographische Ortsbestimmung*. Jahrbuch für Photographie und Reproduktionstechnik 17, 207-217
- SEEBER, G., 1993: *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter, Berlin, New York
- SEEBER, G., TORGE, W., 1985: *Zum Einsatz transportabler Zenitkameras für die Lotabweichungsbestimmung*. Zeitschrift für Vermessungswesen 110, 439-450
- SEGER, H., ALTINER, Y., ENGELHARDT, G., FRANKE, P., HABRICH, H., SCHLÜTER, W., 1998: *Geodätische Vernetzung Europas*. Mitteilungen des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie 1
- SIGL, R., 1975, 1989, 1991, 1993: *Geodätische Astronomie*. Herbert Wichmann Verlag Karlsruhe

- SIGL, R., 1989: *Bedeutung geodätischer Raumverfahren für Landesvermessung und Geodynamik*. Geodätische geophysikalische Arbeiten in der Schweiz 39, 18, Zürich
- SILVERBERG, E., 1980: *Laser-ranging techniques*. In: WILKINS, G.A. (Herausgeber), 1980: *Project MERIT*. Royal Greenwich Observatory, Herstmonceux, und Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt/M., 25-32
- SOLARIĆ, N., ŠPOLJARIĆ, D., VRESK, M., SKENDER, I., 1991: *Automatic Determination of the Astronomical Azimuth by Observing a Celestial Body Using the Electronic Theodolite Kern E2 and the Laptop Computer Toshiba T1600*. Bulletin of the Hvar Observatory 15, 35-43
- SPENCER JONES, H., 1939: *The Rotation of the Earth, and the Secular Accelerations of the Sun, Moon and Planets*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 99 (541), 541-558
- STEPHENSON, F.R., Morrison, L.V., 1994: *Long-term fluctuations in the Earth's rotation: 700 BC to AD 1990*. Philosophical Transactions of the Royal Society A (im Druck); Preprint No. 203 des Royal Greenwich Observatory
- STOLZE, F., 1893: *Die photographische Ortsbestimmung ohne Chronometer und die Verbindung der dadurch bestimmten Punkte untereinander*. Photographische Bibliothek 1, Mayer und Müller, Berlin
- STRAßER, G., 1957: *Ellipsoidische Parameter der Erdfigur (1800-1950)*. Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften A19, München
- THOMAS, D.V., 1964: *Photographic Zenith Tube – Instrument and Method of Reduction*. Royal Observatory Bulletins 81, B195-B217
- TORGE, W., 1980/1991: *Geodesy*. Walter de Gruyter, Berlin, New York
- TORGE, W., 1981: *Resultate und Probleme der Geodibestimmung*. In: *Festschrift 100 Jahre Geodätische Lehre und Forschung in Hannover*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover 100, 71-84
- TORGE, W., 1989: *Gravimetry*. Walter de Gruyter, Berlin, New York
- TORGE, G., WEBER, G., WENZEL, H.-G., 1983: *Ein hochauflösendes gravimetrisches Geoid für Europa und angrenzende Meeresbereiche*. Zeitschrift für Vermessungswesen 108, 321-331
- VANIČEK, P., KRAKIWSKY, E.J., 1986: *Geodesy: The Concepts*. North-Holland, Amsterdam, New York, Oxford, Tokyo
- WAHR, J.M., 1981: *The forced nutation of the elliptical, rotating, elastic, and oceanless earth*. Geophysical Journal 64, 705-727
- WALSER, F., 1987: *Automatisation im Bereich der astro-geodätischen Mess- und Auswertetechnik*. Bericht zum Geodätischen Seminar I WS 86/87. Berichte des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich 128
- WENZEL, H.-G., 1985: *Hochauflösende Kugelfunktionsmodelle für das Gravitationspotential der Erde*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover 137
- WILKINS, G.A., 1980/1: *An Introduction to Project Merit*. In: WILKINS, G.A. (Herausgeber), 1980: *Project MERIT*. Royal Greenwich Observatory, Herstmonceux, und Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt/M., 1-15
- WILKINS, G.A. (Herausgeber), 1980/2: *Project MERIT*. Royal Greenwich Observatory, Herstmonceux, und Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt/M., 1980/1
- WILKINS, G.A., 1985: *International Cooperation in Monitoring the Rotation of the Earth*. Vistas in Astronomy 28, 329-335
- WISSEL, H., 1982: *Zur Leistungsfähigkeit von transportablen Zenitkameras bei der Lotabweichungsbestimmung*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover 107
- WOLF, H., 1949/1: *Die Lotabweichungsausgleichung für das Zentraleuropäische Netz*. In: *Beiträge zur Lotabweichungsausgleichung und Geoidbestimmung*. Veröffentlichung des Instituts für Erdmessung in Bamberg 6/1, 21-44
- WOLF, H., 1949/2: *Die angenäherte Bestimmung des Geoids mittels astronomischen Nivellements im Bereich des Zentraleuropäischen Netzes*. In: *Beiträge zur Lotabweichungsausgleichung und Geoidbestimmung*. Veröffentlichung des Instituts für Erdmessung in Bamberg 6/1, 57-71
- WOLF, H., 1963: *Die Grundgleichungen der dreidimensionalen Geodäsie in elementarer Darstellung*. Zeitschrift für Vermessungswesen 88, 225-233

WOOLARD, E.W., 1953: *Theory of the Rotation of the Earth Around its Center of Mass.*

Astronomical Papers prepared for the Use of the American Ephemeris and Nautical Almanac 15/I

ZIMMERMANN, G., 1965: *Simultanbestimmung der Lotabweichungskomponenten ξ und λ mit dem Prismenastrolabium.* Veröffentlichung der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften B126, Frankfurt/M.

GEODÄTISCHE ANALYSE DYNAMISCHER PROZESSE

Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Welsch

Institut für Geodäsie
Universität der Bundeswehr München
85577 Neubiberg

Zusammenfassung

Die Deformation eines Objekts ist das Ergebnis eines Prozesses. Es entspricht den gegenwärtigen Trends der Deformationsanalyse, die Dynamik dieses Prozesses zu identifizieren. Dazu genügt es nicht, die geometrischen Veränderungen des untersuchten Objekts zu beobachten; vielmehr ist es erforderlich, die verursachenden Kräfte und die physikalischen Eigenschaften des Objekts in die Untersuchungen miteinzubeziehen. Die drei Komponenten – das Objekt, die einwirkenden Kräfte und die verursachten Deformationen – bilden zusammen einen dynamischen Prozeß. Deshalb bedeutet „geodätische Deformationsanalyse“ heutzutage „geodätische Analyse dynamischer Prozesse“. Die geodätischen Analysetechniken sind dazu um Hilfsmittel und Methoden der Mechanik, der Steuer- und Regelungstechnik, insbesondere aber um das Instrumentarium der Systemanalyse zu ergänzen.

1. Klassische Deformationsanalyse

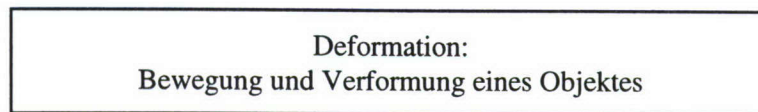


Abb. 1: Konventionelle Deformationsanalyse im "Deformationsraum"

Die klassische Deformationsanalyse untersucht die Bewegung und Verformung eines Objekts in Raum und Zeit. Ihre Bestandteile sind die Ermittlung der Deformation durch Beobachtung und die Auswertung der Beobachtungen (WELSCH, 1981).

An das Meßkonzept werden räumliche und zeitliche Forderungen gestellt. Das Kontinuum des zu untersuchenden Objekts ist in Einzelpunkte aufzulösen (zu diskretisieren) so, daß die Bewegungen der Punkte die Bewegungen und Verformungen des Objektes zutreffend (repräsentativ) beschreiben (charakteristische Punkte). Die Beobachtung oder Abtastung dieser Punkte ist so zu terminieren, daß auch zeitlich nicht-lineare Verformungen erfaßt werden können. Beide Forderungen an das Meßkonzept verlangen zumindest qualitative apriori Informationen über das Objektverhalten.

Die Auswertung der Beobachtungen führt zu rein deskriptiven Aussagen über die Punktbewegungen in Raum und Zeit auch dann, wenn die Bewegungen mathematisch-statistisch analysiert und modelliert werden, um das Verformungsverhalten des Objektes als Ganzes aufzuzeigen. Die Analyse der Deformationen in der Zeit schließt auch das Verhalten im Frequenzbereich ein (Zeitreihenanalyse).

Die klassische Deformationsanalyse verläßt bei all ihren Untersuchungen nicht den "Deformationsraum" des untersuchten Objekts, den sie phänomenologisch beschreibt.

Dem heutigen Selbstverständnis der Geodäsie genügt es jedoch nicht mehr, die Deformation eines Körpers lediglich zu beschreiben. Die Ergebnisse der Deformationsuntersuchungen sollen vielmehr in einen größeren Zusammenhang eingebettet werden, da sie nicht Selbstzweck, sondern ein Werkzeug zur Beobachtung und Analyse natur- und ingenieurwissenschaftlicher Phänomene sind.

Die Deformation eines Körpers ist das Ergebnis eines Prozesses, eines "Spiels der Kräfte". Es gilt, dies Spiel der Kräfte, die Dynamik des Prozesses, zu analysieren. Grundlage der Untersuchungen sind neben den ermittelten Verformungen die beeinflussenden Kräfte und bekannte oder zu ermittelnde Eigenschaften und Gesetzmäßigkeiten des untersuchten Objekts. Die Geodäsie, vornehmlich die Ingenieurvermessung, ist von der zeitlich-räumlichen Beschreibung der Bewegungen und Verformungen eines Objekts zur Erforschung der Prozesse, denen der Körper unterworfen ist, fortgeschritten. Die Aufgabe erfordert eine fachübergreifende Integration von Methoden, die geeignet sind, "dynamische Systeme" zu beschreiben.

2. Dynamische Systeme und Deformationsmodelle

Ein Objekt wird als ein dynamisches System betrachtet, wenn Kräfte, die auf das Objekt einwirken, zu Veränderungen des Objekts führen. Das Objekt kann als physikalisches Filter angesehen werden, das Eingangssignale in Ausgangssignale umwandelt. Die geodätische Analyse eines solchen Systems beschränkt sich auf die Untersuchung von Vorgängen, die zu Veränderungen der *geometrischen* Eigenschaften des Objekts führen. Diese werden allgemein als Deformationen bezeichnet.

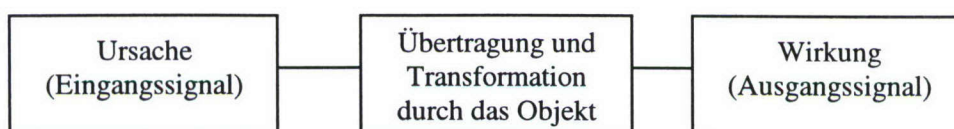


Abb. 2: Dynamisches System, bestehend aus einem Objekt mit Ein- und Ausgangssignal

Im Sinne der Systemtheorie sind "dynamische Systeme" solche, bei denen die gegenwärtige Änderung von Eingangssignalen einen zeitabhängigen Prozeß von Anpassungs- und Ausgleichsvorgängen im System auslöst. Ein solches System speichert Energie, die es zeitverzögert wieder abgibt; das System hat ein "Gedächtnis".

Ein Sonderfall dynamischer Systeme sind solche, die nach Einwirkung äußerer Einflüsse verzögerungsfrei in einen neuen Gleichgewichtszustand übergehen. Diese Systeme heißen "statisch". Bei manchen Deformationsuntersuchungen, z.B. Belastungsproben, werden die eventuell auftretenden zeitlichen Verzögerungen auch außer acht gelassen.

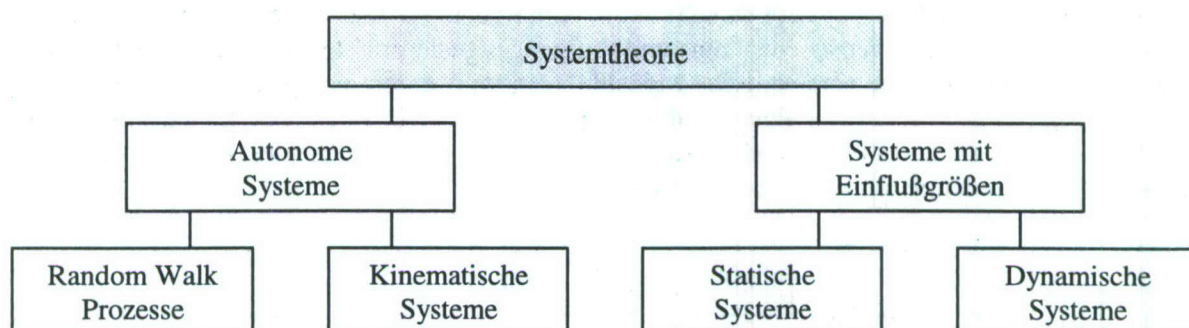


Abb. 3: Hierarchie der Systeme in der Systemtheorie (HEUNECKE, 1995, WELSCH 1996)

Ein weiterer Sonderfall sind Systeme, die keinen auf sie einwirkenden Kräften unterliegen; sie heißen "autonom". "Kinematisch" werden diejenigen autonomen Systeme genannt, die einem allein zeitabhängigen Bewegungsgesetz unterliegen. Streng genommen kann diese Bewegung nur eine lineare sein.

Die Überprüfung räumlicher Identitäten beinhaltet im Sinne der Systemtheorie die Analyse von autonomen Systemen, die keinem (zeitabhängigen) Bewegungsgesetz unterliegen. In diesem Sinne gehören Untersuchungen von Identitäten zu einer Aufgabenstellung, für die der Begriff des „random walk“ geprägt wurde. Die geometrische Qualitätskontrolle im industriellen Bereich oder die Analyse der Stabilität von Referenzpunkten in geodätischen Überwachungsmessungen sind Beispiele.

Die Terminologie und die Klassifizierung der geodätischen Deformationsmodelle ist in die Systemtheorie eingebettet. Den autonomen Systemen entspricht der deskriptive, den Systemen mit Einflußgrößen der kausale Ansatz. Erstere beschreiben lediglich die aufgetretenen Deformationen, letztere beziehen ihre Ursachen mit ein.

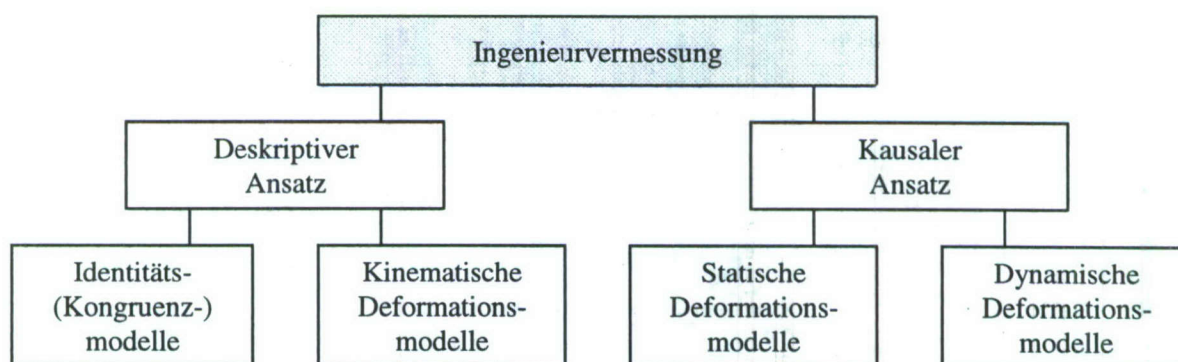


Abb. 4: Modellhierarchie der geodätischen Deformationsanalyse (HEUNECKE, 1995, WELSCH 1996)

Die mathematische Beschreibung des zeitabhängigen Übertragungsverhaltens eines Systems unter Einbeziehung der Ein- und Ausgangsgrößen in dynamischen Modellen liefert einen Beitrag zur "Systemidentifikation".

3. Parametrische und nichtparametrische Modelle

Die Möglichkeit, ein System mathematisch beschreiben zu können, entscheidet über das Modell zur Identifikation.

Sind die physikalischen Gesetzmäßigkeiten eines Systems bekannt, kann ein parametrisches Modell zur Systemidentifikation aufgestellt werden ("white-box"-Modell). Unter "Parameter" werden Größen verstanden, mit deren Hilfe das Übertragungsverhalten des Systems meist durch Differentialgleichungen funktional (strukturiert, deterministisch) beschrieben werden kann.

Sind die physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Übertragungsverhaltens des Systems nicht oder nicht hinreichend bekannt, bleibt das System ohne Struktur. Alle Kenntnisse über das System müssen aus der Analyse der Zeitreihen der gemessenen Ein- und Ausgangssignale ermittelt werden ("input-output"-Modelle). Die nicht mögliche parametrische Modellbildung wird durch nichtparametrisch formulierte Differentialbeziehungen, deren Koeffizienten die Aufgabe von Gewichts- oder Übertragungsfunktionen übernehmen, ersetzt. In diesen Fällen sind die Koeffizienten Regressionskoeffizienten, die physikalisch i.a. nicht unmittelbar zu deuten sind ("black-box"-Modelle).

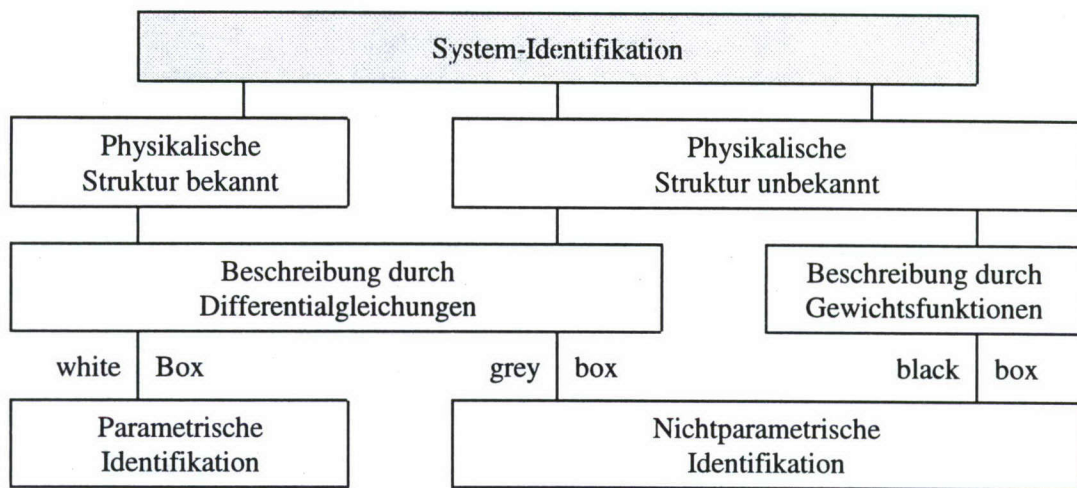


Abb. 5: Methoden der Systemidentifikation (HEUNECKE, 1995)

Die erwähnten "input-output"-Modelle lassen sich im Hinblick auf die Zahl der input- und output-Signale klassifizieren: Es gibt single-input – single-output (SISO), multiple-input – single-output (MISO) und multiple-input – multiple-output (MIMO) Systeme und Modelle:

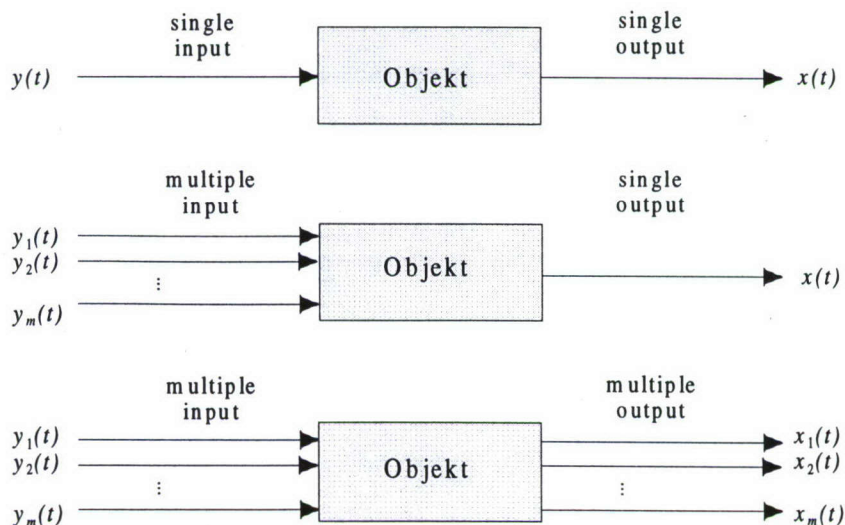


Abb. 6: Input-Output – Modelle (HEUNECKE et al. 1998)

4. Parametrische Modelle mit konzentrierten Parametern

Wird bei der parametrischen Systemidentifikation lediglich die Zeitabhängigkeit des Prozesses, dem das System unterliegt, bedacht, nicht jedoch dessen Ortsabhängigkeit, wird das System durch "konzentrierte" Parameter beschrieben. Es genügen gewöhnliche Differentialgleichungen.

Die Differentialgleichung der linearen Elastodynamik ist die Grundgleichung eines durch konzentrierte Parameter zu beschreibenden dynamischen Modells (HEUNECKE 1995):

$$\begin{bmatrix} K & D & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} = y(t).$$

$y(t)$ ist hierin der Systemeingang, die sog. Stellgrößen, die ggf. noch um Störgrößen zu erweitern sind; $x(t)$ mit seinen Ableitungen ist der (geodätisch zu beobachtende) Systemausgang; in den Matrizen K , D und M sind z.B. im Falle einer Problemstellung aus dem Gebiet der Mechanik Material- bzw. Entwurfsparameter für Steifigkeit, Dämpfung und Masse eines Bauwerks enthalten. Je nach Aufgabenstellung können einzelne Parameter- und Beobachtungsgruppen entfallen. Bei der Untersuchung von Eigenschwingungen entfällt etwa die Dämpfungsmatrix, bei langsamen Verformungen kann die Masse außer acht gelassen werden.

Für eine Klassifizierung dynamischer Modelle ist der Spezialfall

$$K x(t) = y(t)$$

erheblich, da er die grundlegende Beziehung eines statischen Systems beschreibt, das nach Aufbringen einer Last in einen neuen Gleichgewichtszustand mit $y(t) = \text{const.}$ übergeht.

Mit

$$x(t) = \text{const.}$$

ist als Trivialform auch das Identitätsmodell - etwa zur Überprüfung der Kongruenz eines geodätischen Netzes - im allgemeinen Ansatz enthalten.

5. Parametrische Modelle mit verteilten Parametern

Wird bei der parametrischen Systemidentifikation neben der Zeitabhängigkeit auch eine Ortsabhängigkeit des Prozesses betrachtet, so ist das System durch verteilte Parameter zu beschreiben. Dies führt zu partiellen Differentialgleichungen.

Durch Verfahren der Ortsdiskretisierung, die auf bereichsweisen Ansätzen aufbaut, wird es möglich, die partiellen durch Differentialgleichungen, die nur in einem beschränkten Definitionsbereich gültig sind, auszudrücken. Damit besitzt die Grundgleichung der linearen Elastodynamik prinzipiell weiterhin Gültigkeit. Die für die einzelnen Definitionsbereiche gefundenen Lösungen sind unter Beachtung von Randbedingungen aneinanderzufügen und ergeben, was z.B. Flächen- und Körpertragwerke anbelangt, die genäherte Lösung der ursprünglichen Differentialgleichungen.

Ein numerisches Verfahren für bereichsweise Ansätze, das sich für die Untersuchung ebener und räumlich ausgedehnter Objekte anbietet, ist die Methode der finiten Elemente. Auf dieses rechentechnische Verfahren wird hier nicht weiter eingegangen.

6. Nichtparametrische Modelle

Wenn über ein System außer dem Ein- und Ausgangsverhalten keine systemspezifischen Kenntnisse vorhanden sind, kann - lineares und zeitinvariantes Übertragungsverhalten vorausgesetzt - ein mathematisches Modell in Form einer gewöhnlichen Differentialgleichung (q -ter Ordnung)

$$a_q \frac{d^q x}{dt^q} + a_{q-1} \frac{d^{q-1} x}{dt^{q-1}} + \dots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = b_p \frac{d^p y}{dt^p} + b_{p-1} \frac{d^{p-1} y}{dt^{p-1}} + \dots + b_1 \frac{dy}{dt} + b_0 y$$

aufgestellt werden (ELLMER 1987, WELSCH 1996). Die Eingangsgrößen $y(t)$ und die Ausgangsgrößen $x(t)$ müssen als synchrone, äquidistante Zeitreihen vorliegen. Dieses Modell ist ein sehr allgemeines, mit dem eine große Vielfalt von linearen Systemen beschrieben werden kann.

Mit dem Übergang zu Differenzenquotienten entstehen die sog. ARMA (*autoregressive moving average*)-Modelle:

$$x_k = a_1 x_{k-1} + a_2 x_{k-2} + \dots + a_q x_{k-q} + b_0 y_k + b_1 y_{k-1} + \dots + b_p y_{k-p}$$

Die unbekannten Koeffizienten a_k und b_k sind die Parameter oder - klarer ausgedrückt - die Koeffizienten, die für die Identifikation zu schätzen sind. Die Grenzwerte q und p geben die Länge des Gedächtnisses an: Zum Zeitpunkt t_k sammelt das Modell alle input- und output-Ereignisse bis hin zu diesen Schranken.

Charakteristisch für dieses elementare nichtparametrische Modell ist die Tatsache, daß für $q > 3$ und $p > 0$ eine physikalisch interpretierbare Modellstruktur verloren geht, obwohl die Koeffizienten als Funktionen der Material und Design-Parameter des Systems anzusehen sind. Für $q \leq 3$ und $p = 0$ besitzen die Koeffizienten eine physikalische Bedeutung. In diesem Falle spricht man von einem "grey-box"-Modell.

Das ARMA-Modell besteht aus einem rekursiven und einem nichtrekursiven Anteil:

$$x_k = \sum_{i=1}^q a_i x_{k-i} + \sum_{j=0}^p b_j y_{k-j} = R_k(x) + N_k(y).$$

Für $p = 0$ entsteht ein autoregressives Modell, bei dem eine gegenwärtige Beobachtung x_k als Linearkombination vergangener Beobachtungen und des augenblicklichen Systemeingangs y_k betrachtet wird. Für $q = 0$ wird das allgemeine Modell zu einem nichtrekursiven, bei dem sich der gegenwärtige Ausgang aus einer Linearkombination des gegenwärtigen und der zurückliegenden Systemeingänge bestimmt. Die Koeffizienten b_j können dann auch als Gewichtungsfaktoren oder Koeffizienten einer Regressionsanalyse betrachtet werden ("black-box" - Modell).

Für kontinuierliche Beobachtungen wird das nichtrekursive lineare Modell durch das Faltungsintegral

$$x(t) = \int_0^{\infty} g(\tau) y(t-\tau) d\tau$$

(STROBEL 1975) dargestellt, in dem die Koeffizienten der Gewichtsfunktion $g(\tau)$ die Rolle von Regressionsparametern spielen.

Für die Behandlung nichtlinearer Probleme wurde das sogenannte VOLTERRA-Modell (WERNSTEDT 1989) entwickelt:

$$\begin{aligned} x(t) = & \int_0^{\infty} g_1(\tau_1) y(t-\tau_1) d\tau_1 \\ & + \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} g_2(\tau_1 \tau_2) y(t-\tau_1) y(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \\ & + \text{Glieder höherer Ordnung.} \end{aligned}$$

Im diskreten Falle werden die Integrale der kontinuierlichen Modelle durch Summen bzw. Mehrfachsummen ersetzt (PFEUFER 1988).

In jüngster Zeit wurden Verfahren der Kontroll- und Regelungstechnik zur Analyse dynamischer Prozesse in Ein-Ausgangsmodellen übernommen: künstliche neuronale Netze und unscharfe Fuzzy-regelbasierte Modelle (HEINE 1999), die zu lernfähigen Expertensystemen für die Identifikation dynamischer Prozesse weiterentwickelt werden können.

Nichtparametrische Modelle werden vielfältig zur Analyse von Systemen und Prozessen angewendet.

7. Zeitreihenanalyse

Die Zeitreihenanalyse ist ein wichtiges Hilfsmittel für die Systemidentifikation. Im Zeitbereich ist die wichtigste Information, die aus der Zeitreihenanalyse gewonnen werden kann, der Erwartungswert und die Autokovarianzfunktion, die über die Varianz der beobachteten Signale Auskunft gibt. Vergleicht man die Zeitreihen der Eingangs- und Ausgangssignale, indem die Kreuzkovarianzfunktion berechnet wird, erhält man Auskunft über die Korrelation der Zeitreihen und über die Phasenverschiebung darüber, ob und in welchem Maße die Reaktion des Systems gegenüber dem Eingangssignal verzögert ist.

Wendet man FOURIER-Transformationen an, um vom Zeitbereich in den Frequenzbereich zu kommen, gelingt es, charakteristische Frequenzen des Prozesses aufzudecken. Das Ausgangssignal kann nur Frequenzen enthalten, die im Eingangssignal vorhanden sind. Wenn im Ausgangssignal Frequenzen entdeckt werden, die im Eingangssignal nicht auftauchen, liegt folglich der Schluß nahe, daß außer den untersuchten auch andere Einflußfaktoren auf das System wirken.

Die Zeitreihenanalyse hat einen weiten Anwendungsbereich (KUHLMANN 1996). In sehr vielen Fällen ist die Analyse der Zeitreihen $x(t)$ und $y(t)$ die Basis der nichtparametrischen Systemidentifikation.

8. KALMAN-Filterung

Das mathematisch-statistische Hilfsmittel zur Lösung der Aufgabe, aus Theorie und Empirie das Übertragungsverhalten eines Systems zu ermitteln, ist das KALMAN-Filter (HEUNECKE 1995).

Die ursprünglichen Differentialgleichungen, die die Übertragungseigenschaften des Systems beschreiben, werden in ein Vektordifferentialgleichungssystem 1. Ordnung umgewandelt. Die in diesem System auftretenden Unbekannten werden Zustandsparameter oder -variable $x(t)$ genannt. Sie sind Größen, die - je nach der Art der ursprünglichen Differentialgleichungen - das System unmittelbar oder mittelbar physikalisch definieren oder lediglich einen nicht interpretierbaren Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen herstellen. Ihr Wert zu einem bestimmten Zeitpunkt spezifiziert den Zustand des Systems zu eben diesem Zeitpunkt. Aus geodätischer Sicht sind die Zustandsparameter zunächst Koordinaten, Geschwindigkeiten etc., kurz (geodätisch) beobachtbare Größen.

Zu bedenken ist, daß das deterministische Systemmodell additiv von einem System- oder Störuschen $w(t)$ überlagert wird. Das Gleichungssystem in Form einer Differenzengleichung ist die sog. Systemgleichung. Sie lautet in diskreter Form

$$\bar{x}_{k+1} = T_{k+1,k} x_k + B_{k+1,k} y_k + C_{k+1,k} w_k$$

und beschreibt den Übergang vom Zeitpunkt t_k zum Zeitpunkt t_{k+1} . Die Matrix T wird als Transitions-, die Matrix B als Stellgrößenmatrix und C als Störgrößenmatrix bezeichnet.

Es ist anzumerken, daß die hier beschriebenen Systeme die Eigenschaften der Linearität und der Zeitinvarianz besitzen. Die Linearität wird ggf. durch Linearisierung erreicht. Die Zeitinvarianz zeigt sich darin, daß die Matrizen T , B und C nicht von der Zeit abhängig sind. Der erste Term der Gleichungen stellt die autonome Bewegung (Gedächtnis) des Systems dar, der zweite seine durch die Stellgrößen erzwungene Bewegung und der dritte die Überlagerung des Systems durch das Störuschen.

Die Systemgleichung ist durch die Meßgleichung zu ergänzen. Mit ihr wird die direkte oder indirekte Beobachtung der Zustandsparameter mit dem System verknüpft:

$$l_{k+1} = A_{k+1} x_{k+1}$$

Angesichts der realen Welt muß die bisher verwendete deterministische Darstellung als unvollständig betrachtet und durch ein stochastisches Modell erweitert werden. Hierauf wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Das vereinigte Modell stellt den KALMAN-Filteransatz dar.

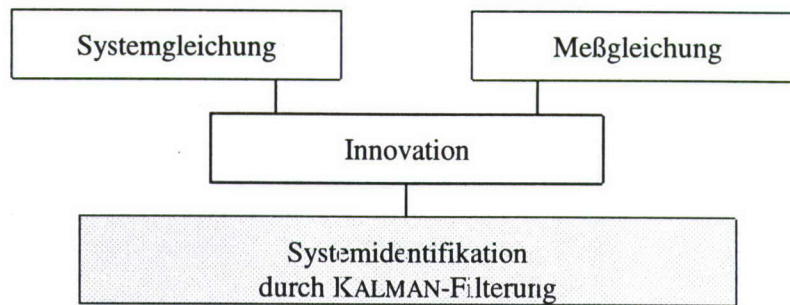


Abb. 7: Grundlegender Gedanke der Kalman-Filterung

Als Innovation wird der Unterschied zwischen den durch die Systemgleichung fortgeschriebenen und den durch die Meßgleichung real beobachteten (geometrischen) Verhältnissen bezeichnet:

$$d_{k+1} = l_{k+1} - A_{k+1} \bar{x}_{k+1}.$$

Mit Hilfe der sog. Verstärkungsmatrix K_{k+1} erfolgt schließlich die Aufdatierung des Zustandsvektors, der die neuen Verhältnisse beschreibt:

$$\tilde{x}_{k+1} = \bar{x}_{k+1} + K_{k+1} d_{k+1}.$$

Die Schwierigkeiten der Systemidentifikation liegen weniger in der algorithmischen Durchführung als in der Formulierung der Transitions-, Stellgrößen- und Störgrößenmatrizen, die problemorientiert zu erfolgen hat und wegen der Vielzahl der Anwendungen nicht allgemeingültig angegeben werden kann. Bei vielen Aufgabenstellungen - z.B. im Bereich der Ingenieurgeologie - sind zudem die in den Systemmatrizen enthaltenen Material- und Entwurfsparameter nicht hinreichend genau bekannt. Sie sind dann als zu ermittelnde Größen in den Zustandsvektor aufzunehmen, um zu erreichen, daß die Innovation im Sinne einer adaptiven Filterung zu Null oder vernachlässigbar klein wird (Systemverifikation). Die Frage, welche Prozeßparameter in die Adaption aufzunehmen sind, muß vom Anwender von Fall zu Fall - u.U. auf der Grundlage von Sensitivitätsanalysen - entschieden werden.

9. Drei Beispiele

Die folgenden Beispiele sollen die Anwendung verschiedener Modelle zur Analyse dynamischer Prozesse veranschaulichen.

9.1 Rezente Krustenbewegungen und die Analyse eines Erdbebens

Seit dem Erdbeben von San Francisco im Jahre 1906 weiß man, daß geodätische Netze von fundamentaler Bedeutung für die Untersuchung von rezenten Krustenbewegungen und für die Analyse von Erdbeben sind. Die Translokationstheorie stellt das mathematisch-physikalische Rüstzeug zur Verfügung, mit dessen Hilfe berechnet werden kann, mit welchen Deformationen der Oberfläche der Erdkruste zu rechnen ist, wenn durch ein Erdbeben an einer Herdfläche in der Lithosphäre Blattverschiebungen in horizontaler und vertikaler Richtung (strike slip und dip slip) erfolgen. Die inverse Lösung berechnet aus den geodätisch ermittelten Verformungen der Erdoberfläche die Verschiebungen an der Herdfläche.

Die verursachenden Kräfte (die Stärke des Erdbebens) und die Systemparameter (die physikalische Struktur der Erdkruste sowie die Dimensionen, die Lage und Orientierung der Herdfläche) werden als bekannt angesehen. Das Übertragungsverhalten des dynamischen Systems kann durch Differentialgleichungen beschrieben werden.

Der dynamische Prozeß der Herdflächenverschiebung wird durch ein parametrisches statisches Modell mit konzentrierten oder - in einer Weiterentwicklung der Analysetechnik (KERSTING 1992) - auch durch verteilte Parameter beschrieben ("white box model").

9.2 Reaktion der Fundamente einer Großturbine auf Temperaturänderungen

Die korrekte Ausrichtung ihrer Achse ist für den reibungslosen Lauf einer Turbine von größter Bedeutung. Deshalb werden die Achse selbst und die Fundamente der Turbine durch eine Vielzahl von Meßeinrichtungen überwacht, um alle die Betriebssicherheit beeinflussenden Deformationen rechtzeitig erkennen zu können. Ein wesentlicher Einfluß, der zu Störungen führen kann, sind plötzliche Temperaturänderungen, die auf die Stützen des Turbinentisches einwirken. Solche Temperaturänderungen können z.B. beim Eindringen der Außentemperatur beim Öffnen der Tore des Maschinenhauses auftreten.

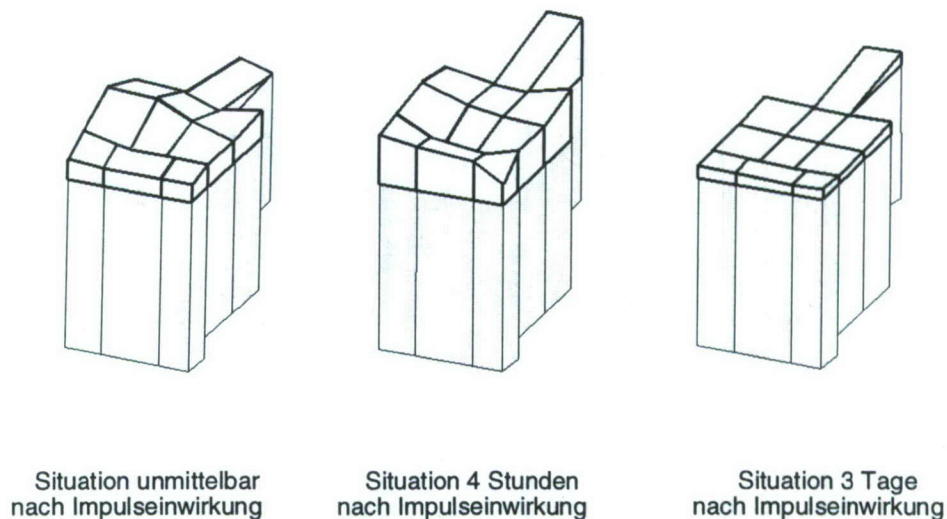


Abb. 8: Reaktion des Turbinentisches auf einen Einheitsimpuls von 1°C

Der dynamische Prozeß besteht in der Abhängigkeit der zu überwachenden Stützenlängen von Temperaturänderungen der Maschinenhalle, die sich auf die Vielzahl der Stützen in verschiedenem Maße auswirken. Bekannt ist also die einwirkende Kraft und die auftretenden Deformationen, unbekannt hingegen ist das Übertragungsverhalten der einzelnen Stützen.

Die Untersuchungen (ELLMER 1987) wurden in einem nichtparametrischen, nichtrekursiven ARMA-Modell durchgeführt (input-output- (SISO)-Modell, "black box"-model).

9.3 Überwachung einer Brücke unter verschiedenen Lastfällen

Eine Stahlbetonbrücke geriet unter dem Einfluß einer auf sie wirkenden Hangrutschung in einen Spannungszustand. Zur Entlastung wurde eine Dehnungsfuge eingebracht. Die Reaktion der Brücke unmittelbar nach dem Öffnen der Fuge sowie ihr Langzeitverhalten wurden durch trigonometrische Messungen beobachtet (HOLLMANN et al. 1994).

Im Laufe der mehrjährigen Überwachung der Brücke wurden verschiedene Lastfälle untersucht: die Reaktion der Brücke auf die Befreiung vom Hangdruck, Versuche zur Ermittlung der zulässigen Belastung durch Verkehrslast, Auswirkung von Temperatureinflüssen.

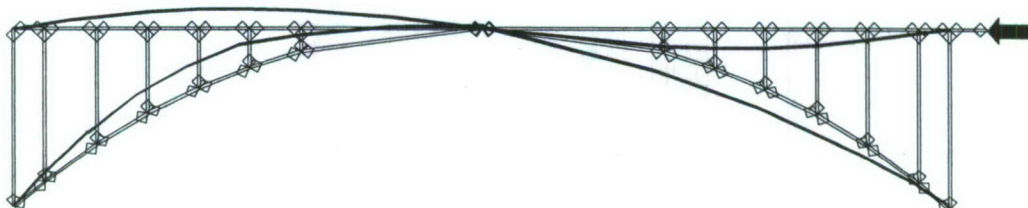


Abb. 9: Stabmodell der Grünwalder Brücke unter Belastung

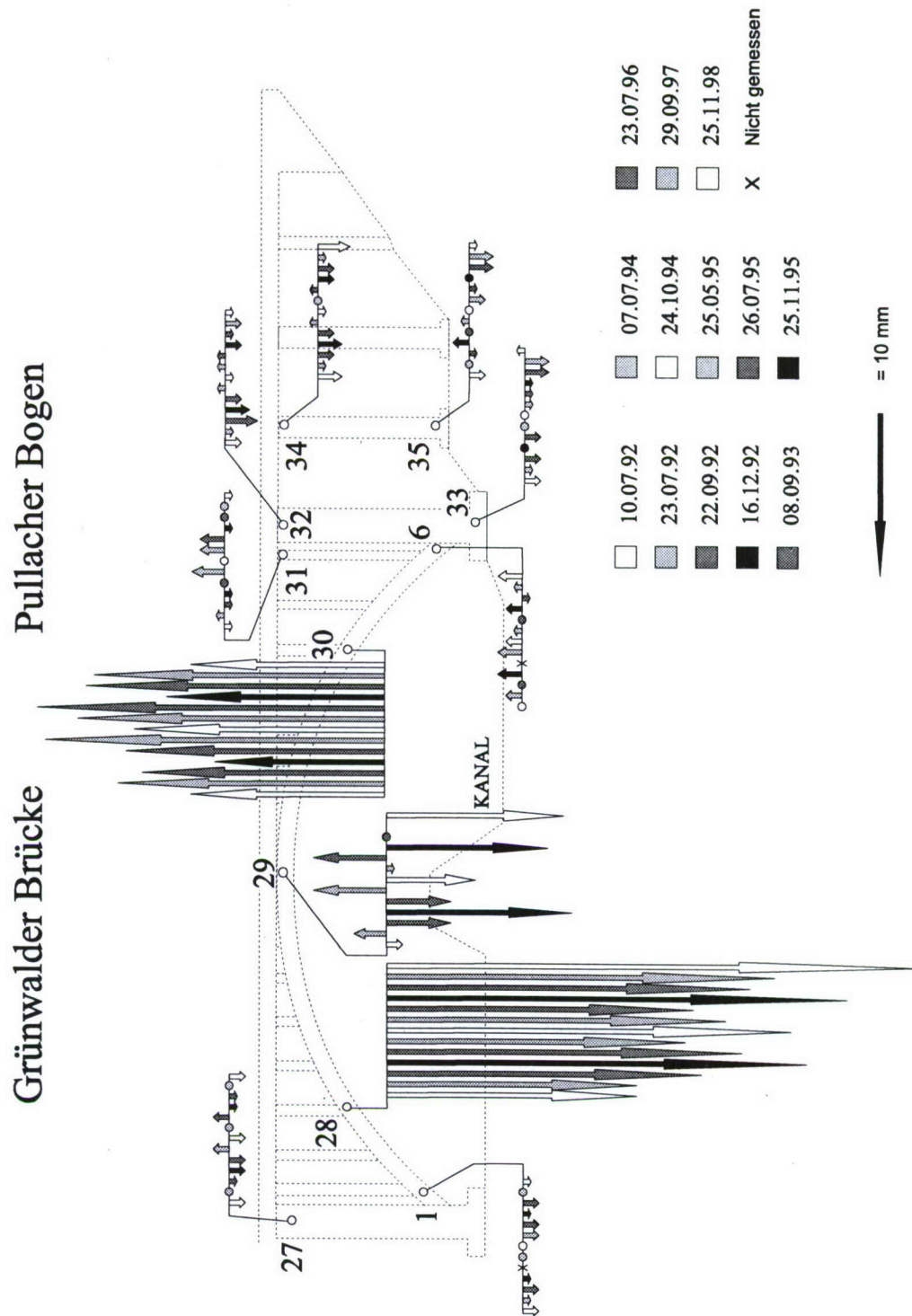


Abb. 10: Reaktion der Brücke nach Öffnung der Entlastungsfuge

Für die Analyse der Messungen, die im Rahmen der Untersuchungen durchgeführt wurden, wurden in Zusammenarbeit mit den beteiligten Bauingenieuren parametrische Modelle verwendet:

- Die unmittelbare Reaktion der Brücke nach dem Öffnen der Dehnungsfuge wurde prädictiert. Die qualitative Aussage stimmte sehr gut mit den Ergebnissen überein, die quantitative war jedoch aus noch nicht geklärten Gründen eher unzutreffend.
- Das Langzeitverhalten - die elastische Nachwirkung - wurde mit guten Ergebnissen überprüft.
- Der Temperatureinfluß - die Beobachtungen wurden teils im Sommer, teils im Winter ausgeführt - konnte vollständig kompensiert werden.
- Die Verformung der Brücke nach Aufbringen verschiedener Lasten zur Untersuchung der Tragfähigkeit wurde qualitativ zutreffend, quantitativ unzutreffend vorherberechnet. Die Ursachen für die fehlende Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung konnten noch nicht angegeben werden.

!!!!

Eine Frage bleibt offen: In welchem Maße sollte sich der Vermessungsingenieur mit den speziellen Problemen, Verfahrensweisen und Techniken benachbarter Disziplinen, in deren Auftrag er Messungen zur Analyse dynamischer Prozesse durchführt, vertraut machen? Welche Kenntnisse sind für eine effektive Zusammenarbeit erforderlich? Was sollte im Studium gelehrt werden?

10. Literatur

- ELLMER, W. (1987): Untersuchung temperaturinduzierter Höhenänderungen eines Großturbinentisches. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 26, 105 S., Neubiberg
- HEINE, K. (1999): Zur Analyse und Identifikation dynamischer Deformationsprozesse durch Ein-Ausgangs-Modelle. Dissertation im Fachbereich für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, 130 S., im Druck
- HEUNECKE, O. (1995): Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver KALMAN-Filterung (Hannoversches Filter). Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 208, 185 S., Hannover
- HEUNECKE, O., PELZER, H., WELSCH, W. (1998): On the classification of deformation models and identification methods in engineering surveying. XXI. FIG-Congress, Brighton. Proceedings Commission 6, pp. 230-245
- HOLLMANN, R., LANG, M., WELSCH, W. (1994): Geodetic surveillance and the dynamic behaviour of a bridge. Perelmuter Workshop on Dynamic Deformation Models, Proceedings, pp. 152-170, The Technion, Haifa, Israel
- KERSTING, N. (1992): Zur Analyse rezenter Krustenbewegungen bei Vorliegen seismotektonischer Dislokationen. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 42, 242 S., Neubiberg
- KUHLMANN, H. (1996): Ein Beitrag zur Überwachung von Brückenbauwerken mit kontinuierlich registrierten Messungen, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 218, Hannover
- PFEUFER, A. (1988): Ein Beitrag zur Identifikation und Modellierung dynamischer Deformationsprozesse. Dissertation an der Fakultät für Bau-, Wasser- und Forstwesen der Technischen Universität Dresden
- STROBEL, H. (1975): Experimentelle Systemanalyse. Akademie-Verlag, Berlin
- WELSCH, W. (1981): Gegenwärtiger Stand der geodätischen Analyse und Interpretation geometrischer Deformationen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 88, S. 41-51

- WELSCH, W. (1996): Geodetic analysis of dynamic processes: Classification and terminology, 8th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Hong Kong, pp. 147-156
- WERNSTEDT, J.(1989): Experimentelle Prozeßanalyse. R. Oldenbourg Verlag, München-Wien

ZUR ÜBERPRÜFUNG GEODÄTISCHER INSTRUMENTE

H. Heister
Geodätisches Institut
Universität der Bundeswehr München
85577 Neubiberg
E-mail: h.heister@unibw-muenchen.de

Zusammenfassung

Die Überprüfung und Kalibrierung der Meßmittel sind traditionelle Aufgaben aller meßtechnisch orientierten Ingenieure. Die Notwendigkeit zur Durchführung dieser Aufgaben liegt darin begründet, daß alle Meßprozesse durch zufällige aber auch systematische Meßabweichungen beeinflußt werden. Auch der Vermessungsingenieur hat die Aufgabe, zuverlässige Ergebnisse und definierte Genauigkeitsangaben zu verantworten. Wurden hierfür früher langjährig erprobte und eingeführte Verfahren eingesetzt, so ist dies heute aus vielfältigen Gründen nicht mehr möglich. In den letzten Jahren haben neue Technologien und steigende Komplexität der Meßsysteme die Einführung von Prüfverfahren erschwert, in einigen Bereichen sogar unmöglich gemacht. Andererseits verlangt zunehmend ein modernes Qualitätsmanagement System nach ISO 9000 ff. ein Bestätigungssystem für Meßmittel. Dieses beinhaltet hierarchisch gegliederte, dokumentierte Prüfverfahren. Im folgenden werden unter Beachtung von wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen hierfür Anregung und Konzepte vorgeschlagen.

1. Einführung

Der unaufhaltsame Trend zu automatisierten, Mikroprozessor gesteuerten Meßgeräten bis hin zu vollautomatischen „black-boxes“ und der vermehrte Einsatz dieser Multi-Sensor-Systeme auch durch den Vermessungsingenieur in der Praxis verlangt nach neuen strukturierten Methoden zum Überprüfen, Testen und Kalibrieren dieser Meßsysteme, um weiterhin den traditionellen Zielen nach zuverlässigen und genauen Meßergebnissen gerecht zu werden. Dies gewinnt um so mehr an Bedeutung, da zunehmend zur Durchführung der eigentlichen Messung vor Ort auch weniger qualifiziertes – bis hin zu fachfremden - Personal eingesetzt wird. Bewährte Prüfmethoden erfüllen in den meisten Fällen kaum noch die Anforderungen, modernes Instrumentarium auf Funktionstüchtigkeit, Zuverlässigkeit und Richtigkeit durchgreifend zu kontrollieren. Selbst Fachleute sind oft bei der Beantwortung der hierbei auftretenden Fragen überfordert. Zusätzlich verlangt ein modernes Qualitätsmanagementsystem (QMS) nach DIN ISO EN 9000 ff. Verfahrensanweisungen zur Überprüfung der Meßmittel. Mit dem QM-Element 11, beschrieben in der ISO 9001, wird die Meßmittelüberwachung einschließlich der Überwachungsverfahren eindeutig festgelegt. Für das meßtechnische Bestätigungssystem wird dann auf ISO 10012 *Forderungen an die Qualitätssicherung für Meßmittel* verwiesen. Hierin werden detailliert Terminologie, Forderungen und Anleitungen zur Durchführung behandelt.

Diese Umstände erfordern neue bzw. angepaßte Prüfmethoden, die eine schnelle technische Umsetzung gewährleisten, wobei der Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren – besonders im Hinblick auf die praktische Akzeptanz - große Bedeutung zukommt. Verfolgt man die Veröffentlichungen auf diesem Gebiet z.B. FISCHER (1998), GOTTWALD (1998), STAIGER (1998), so stellt man fest, daß die

Notwendigkeit zum Handeln heftig diskutiert wird, daß aber neue, brauchbare Verfahren nur in Ansätzen vorgestellt werden. Dies verdeutlicht die Schwierigkeit dieser Materie, die besonders durch die kurzen Innovationszyklen geodätischer Meßgeräte aber auch durch lückenhafte Informationen über Funktionsprinzipien begründet ist, die leider - durch die Hersteller häufig beabsichtigt und unterschiedlich motiviert - unveröffentlicht bleiben.

Zunächst sollen die verschiedenen Stufen bzw. Begriffe, die bei der Überprüfung eines Meßgerätes zu unterscheiden sind, definiert werden:

- **Prüfung:** Eindeutig beschriebener experimenteller Vorgang mit dem Ziel sicherzustellen, ob bestimmte Eigenschaften des Meßinstrumentes weiterhin den vorgegebenen Anforderungen entsprechen. Im allgemeinen sind dies einfache und robuste Feldverfahren, die durch den Nutzer täglich oder wöchentlich durchgeführt werden, um die korrekte Funktion sicherzustellen.
- **Test:** Umfangreiche Untersuchung des Meßsystems, die unter Vorgabe eines bestimmten Zieles i.d.R. die Bewertung der Gesamtleistung (bzw. der vom Hersteller angegebenen Spezifikationen) und unter Benutzung der Gebrauchsanweisungen durchzuführen ist. Tests können einzelne Sensor-Komponenten, das Sensorsystem, Soft- oder Firmware aber auch Meßmethoden umfassen.
- **Kalibrierung:** Ermitteln des Zusammenhanges zwischen dem Meßwert (oder auch dem arithmetischen Mittel mehrerer unter Wiederholungsbedingungen gewonnener Meßwerte) und dem wahren oder richtigen Wert der Meßgröße. Dieser Zusammenhang dient als Grundlage für die Ermittlung von Kalibrierkonstanten, -faktoren oder einer empirischen Kalibrierfunktion. Das Ergebnis einer Kalibrierung kann auch die Schätzung von Meßabweichungen und Meßunsicherheiten ermöglichen (s.a. DIN1319 – 1).

Eng verbunden mit diesen Begriffen ist die

- **Justierung:** Tätigkeit, die das Meßgerät in einen meßbereiten Zustand bringt, wobei für die vorgesehene Anwendung verfälschend wirkende systematische Meßabweichungen beseitigt werden (n. DIN ISO 10012 – 1). Die Justierung erfordert im Gegensatz zur Kalibrierung damit einen Eingriff, der das Meßgerät bleibend verändert.

Alle diese hierarchisch aufgezählten Verfahren instrumenteller Überprüfung sind nicht nur notwendig, um zuverlässige und in einem vorgegeben Genauigkeitsmaß ermittelte Meßergebnisse zu garantieren, sondern sind auch Bestandteil eines Bestätigungssystems für Meßmittel gemäß DIN ISO 9001 und 10012 -1.

2. Bestätigungssystem für geodätische Meßmittel

Der Begriff *Bestätigungssystem für Meßmittel* ist festgelegt in DIN ISO 10012 – 1 und umfaßt die Gesamtheit aller Tätigkeiten, die notwendig sind sicherzustellen, daß ein einzelnes Meßmittel den Status der Erfüllung der Forderungen besitzt, die für seine beabsichtigte Verwendung gelten. Ein solches System beinhaltet die Organisation, Verfahrensanweisungen und Verantwortlichkeiten für alle Tätigkeiten, die Prüfung, Test, Kalibrierung und Justierung aber auch notwendige Reparatur und anschließende Rekalibrierung, Kennzeichnung und Zertifikat einschließen. Abbildung 1 zeigt die Hierarchie der Kalibriertätigkeiten sowohl auf staatlicher als auch betrieblicher Ebene. Hierbei wird auch die Rückführbarkeit der verwendeten Normale sichtbar, die besonders innerhalb eines Qualitätsmanagementsystems lückenlos nachzuweisen ist.

Nach dieser Darstellung lassen sich alle Prüf- und Kalibriertätigkeiten in zwei Säulen aufspalten:

- Tätigkeiten, die nur von akkreditierten Laboratorien ausgeführt werden können/dürfen, da sie über entsprechende technische Kompetenz und hochwertige instrumentelle Ausstattung verfügen.
- Prüfverfahren, die innerbetrieblich von entsprechend qualifiziertem technischen Personal nach vorgegeben Verfahrensanweisungen ausgeführt werden, die innerhalb eines Zertifizierungsverfahrens begutachtet wurden.

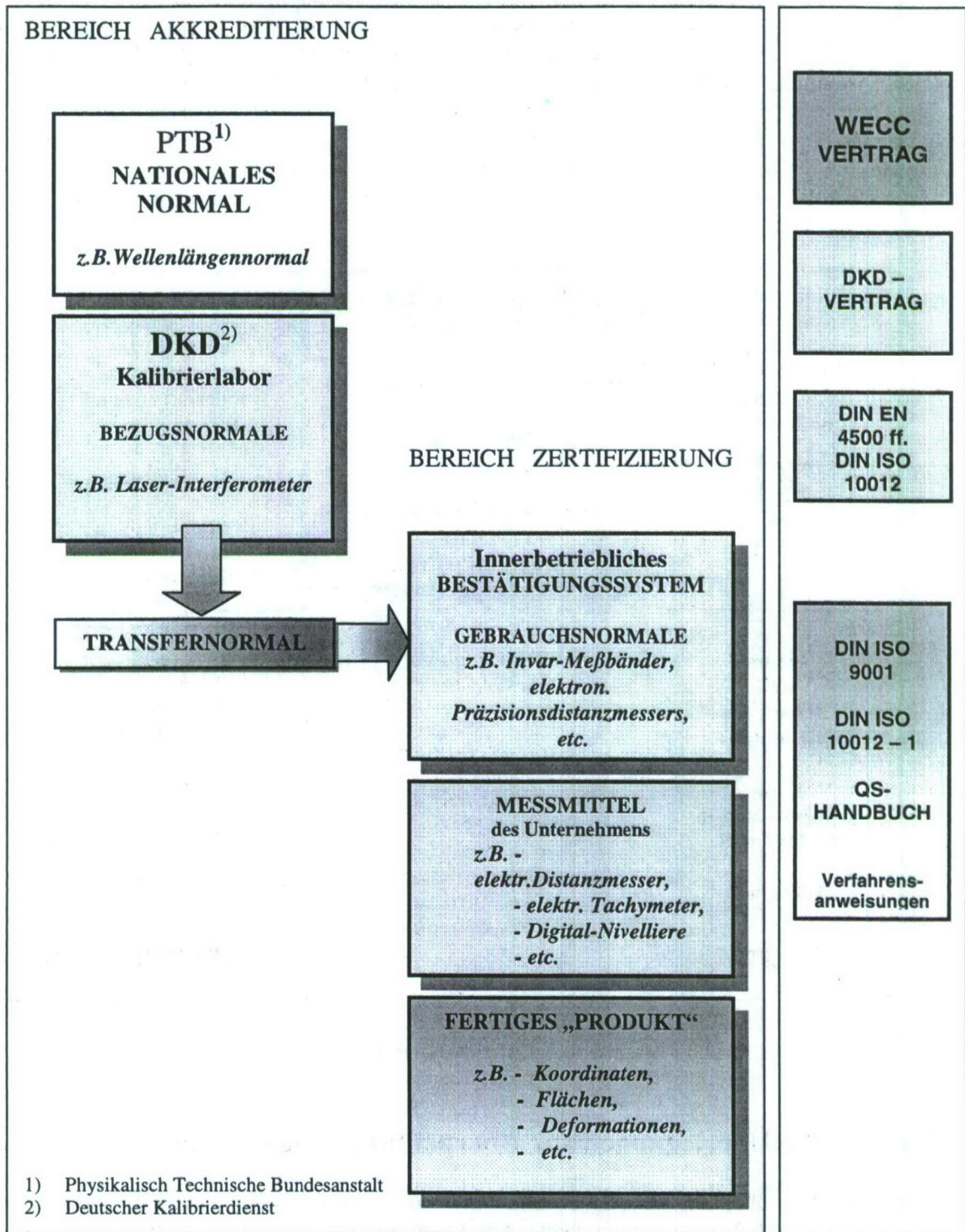


Abb. 1: Kalibrierhierarchie und Rückführbarkeit der Normale (in Deutschland)

Obwohl beide Säulen eine wichtige Funktion im Gesamtkomplex Prüfen und Kalibrieren geodätischer Meßinstrumente einnehmen, hat das innerbetriebliche Bestätigungssystem für den praktisch tätigen

Geodäten eine vorrangige Bedeutung. Die Stellung der durch den Deutschen Kalibrierdienst (DKD) akkreditierten Labore ist im geodätischen Bereich im Gegensatz zu anderen meßtechnischen Disziplinen noch nicht sehr ausgeprägt. Die Aufgaben werden z.Zt. vorrangig von Laboratorien wahrgenommen, die bei Hochschulen und Universitäten angesiedelt sind. Dabei werden nicht nur die routinemäßigen Kalibrierungen durchgeführt, sondern auch umfangreiche instrumentelle Tests, um daraus Prüfverfahren für die Praxis abzuleiten.

Das innerbetriebliche Bestätigungssystem (s. Abb. 2) legt vorrangig die Verantwortlichkeit für die Funktionstüchtigkeit des gesamten einsetzbaren Instrumentariums eines Ingenieurbüros oder einer Vermessungsinstitution fest. Hierzu gehört auch die Instandhaltung, die Überwachung der Kalibrierfristen, die Archivierung von Zertifikaten und Dokumentationen über den Zustand, die Veranlassung von Reparaturen, die Abfassung und Festlegung von Prüfungsanweisungen sowie die Überwachung und Rückführung der Gebrauchsnormale. Aber auch Tätigkeiten wie Analyse der Meßwerte und statistische Tests zur möglichst objektiven Festlegung von Kalibrier- und Prüfintervallen gehören zu den Aufgaben, die in einem Bestätigungssystem festzulegen sind.

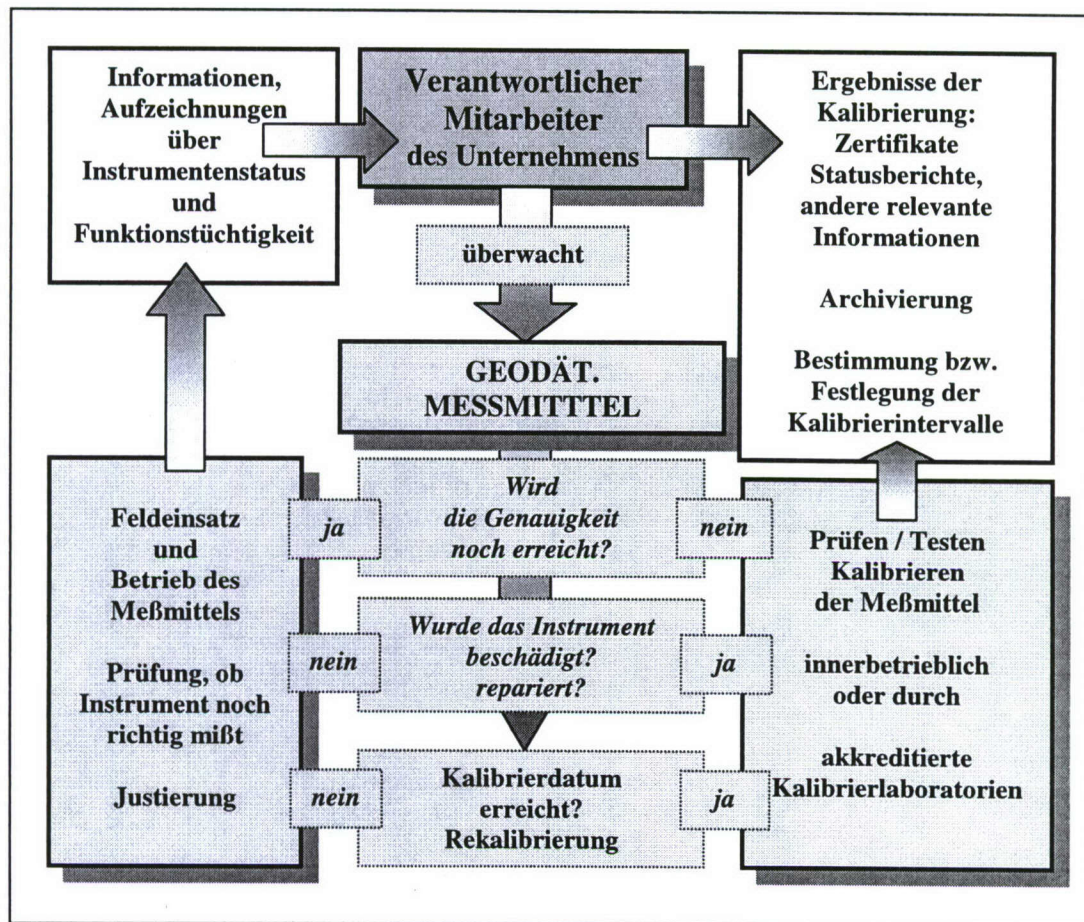


Abb. 2: Struktur des innerbetrieblichen Bestätigungssystems für Meßmittel

3. Allgemeine Überlegungen zur Überprüfung geodätischer Instrumente

Die alten Begriffe über Aufbau und Funktionselemente von Theodolit, Nivellier o.a. können auf modernes opto-elektronisches Instrumentarium kaum noch übertragen werden. Die bewährten Methoden zur Prüfung, Kalibrierung und zum Testen sind weitgehend unbrauchbar. Neuere Vermessungsinstrumente werden im Hinblick auf ihre Funktion besser durch ein Blockdiagramm, wie in Abbildung 3 beispielhaft für einen elektronischen Tachymeter dargestellt, beschrieben. Diese Form der Strukturierung zeigt übersichtlich die Interaktion aller optischen, mechanischen und elektronischen Komponenten. Je nach Tiefe der Ausarbeitung einer solchen Struktur lassen sich auch insbesondere

Bedeutung und Auswirkung von Software, Firmware, externe und interne Datenströme darstellen. Die richtige Bedienung dieser Multi-Sensor-Systeme ist heute teilweise so komplex geworden, daß es selbst für Experten schwierig ist, *alle* Funktionen insbesondere unterschiedlicher Typen oder Hersteller zu beherrschen. Bereits die Initialisierungsprozedur eines elektronischen Tachymeters kann mehr als 100 Bedienschritte erfordern! Die Vielzahl der Instruktionen zur Bedienung des Gerätes und der Möglichkeiten zur Eingabe von Konstanten und anderen Korrekturparametern haben nicht nur den

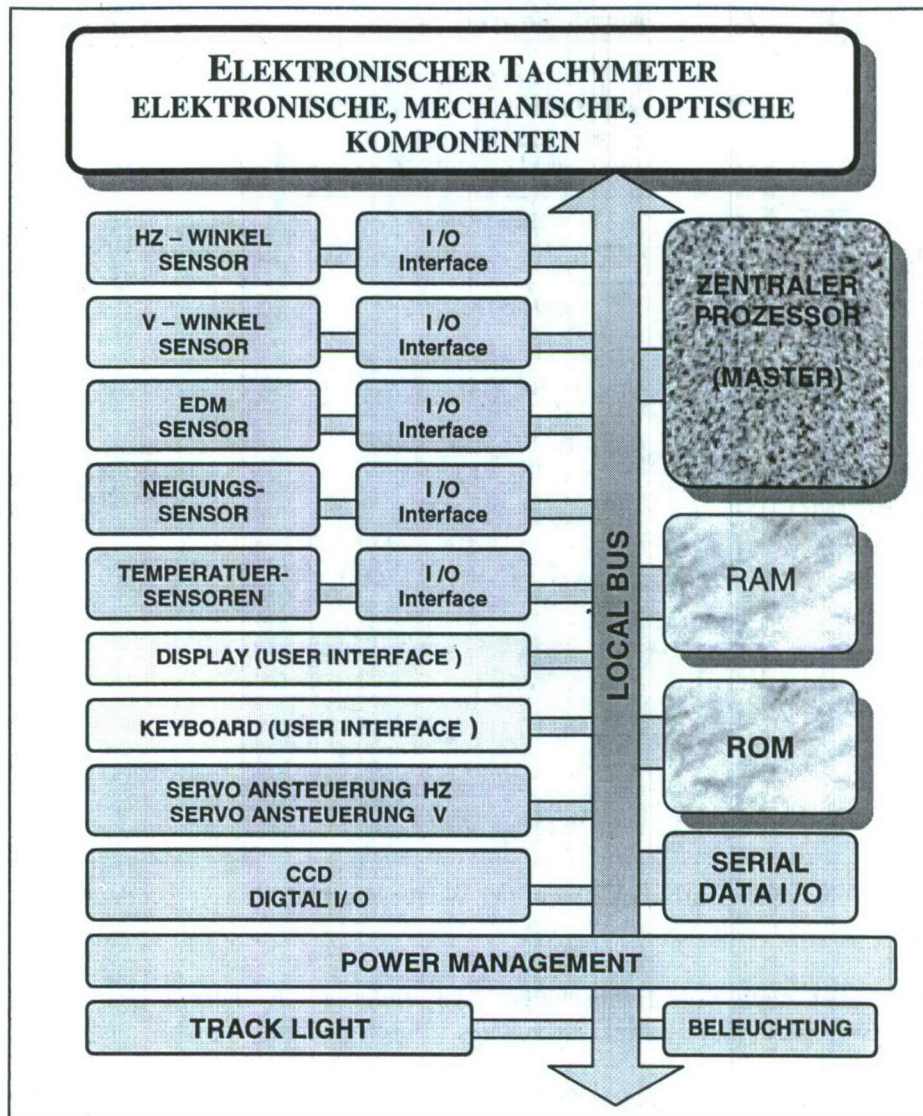


Abb.3: Strukturierung der Funktionselemente eines modernen elektronischen Tachymeters

Vorteil der Weiterverarbeitung von Rohdaten im Felde bis hin zum anwendungsbezogenen Endergebnis, sondern bedeuten sowohl für Hersteller als auch Anwender eine Gefahr zur ungewollten Verfälschung des Meßergebnisses (HENNES, 1998). Die komplexe und meistens nicht nachvollziehbare Abfolge vom originären Sensorsignal bis hin zum endgültigen „Produkt“, der Koordinate, Höhe, Fläche o.a., macht es häufig unmöglich, Fehler oder Widersprüche im Meßergebnis zu lokalisieren bzw. aufzulösen. Selbst die Feststellung einer Fehlbedienung oder fehlerhafter Messung ist teilweise unmöglich. Das sequentielle Zusammenwirken von Rohdaten, Konstanten, Korrekturdaten (permanent abgespeichert oder durch den Nutzer veränderbar), Anwendersoftware und Meßmethode bis hin zum projektbezogenen, endgültigen Meßergebnis ist in Abbildung 4 schematische dargestellt.

Diese Abfolge sowie die Vielfältigkeit der Sensorik macht deutlich, daß es für den Anwender sehr schwierig ist, durchgreifende Prüf- und Kalibrierverfahren festzulegen. Deshalb ist angeraten,

weniger einzelne Sensoren als vielmehr Sensorgruppen oder sogar das Meßsystem in seiner Gesamtheit zu prüfen. Im konkreten Fall ist es nicht so einfach, für die Praxis wirtschaftlich akzeptable und dennoch durchgreifende Verfahren bereitzustellen. Erste Vorschläge hierzu wurden von GOTTWALD (1998) und FISCHER (1998) diskutiert. Diese zeigen, daß es vorrangig die Aufgabe

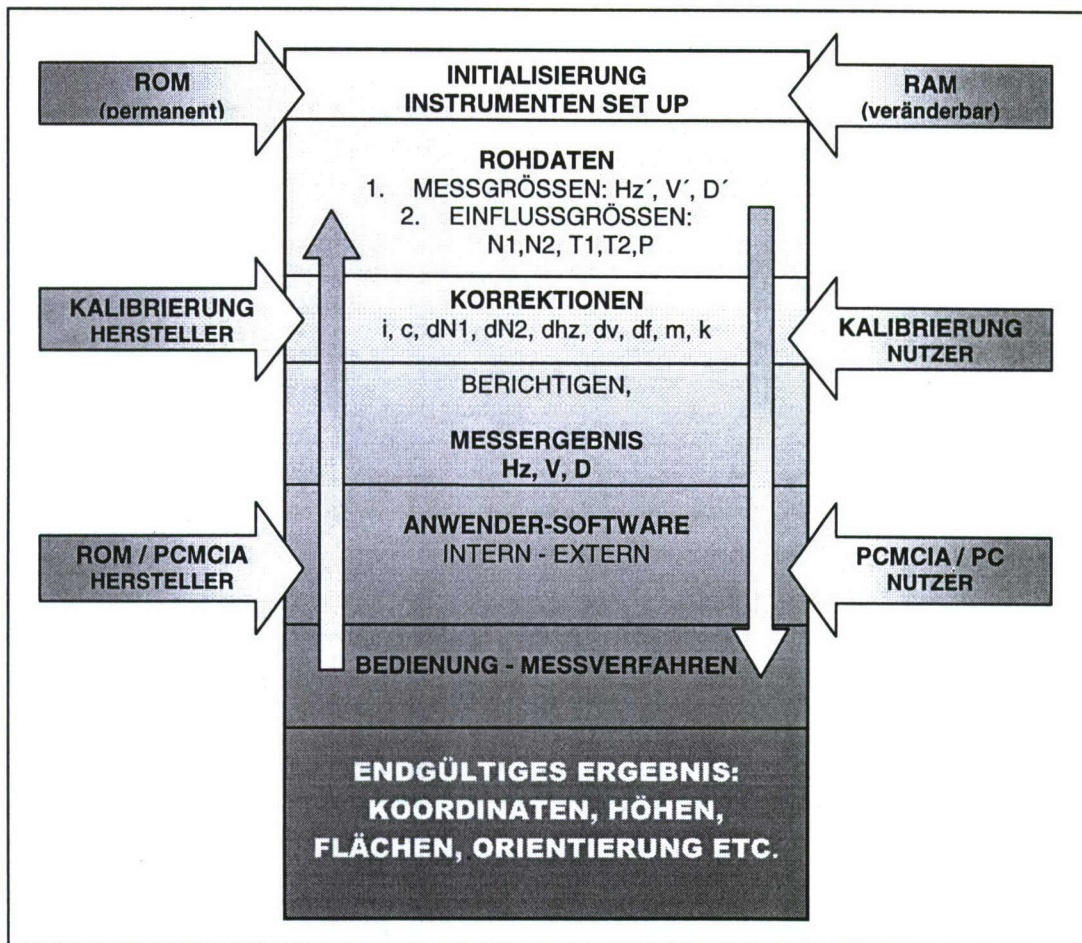


Abb.4: Schematischer Ablauf der Weiterverarbeitung von Rohdaten

von Herstellern, aber auch von Hochschulen oder anderen auf diesem Gebiet spezialisierten Institutionen bleiben wird, aufwendige Typentests durchzuführen, um hieraus die notwendigen Prüfverfahren abzuleiten.

GOTTWALD (1998) aber auch STAIGER (1998) schlagen vor, generell ein Vier-Phasen-Modell bei der Konzeption von Prüfverfahren zu verfolgen:

Phase 1 umfaßt die Funktionsprüfung (nach Gebrauchsanweisung) oder einfache Sichtkontrollen, die in kurzen Zeitabständen vor Beginn der Messung und/oder im Felde durchgeführt werden.

Phase 2 bezieht sich auf Prüfungen, die in längeren Zeitabständen periodisch oder aber auch ereignisbedingt (z.B. längerer Transport, vor speziellen Meßaufgaben u.a.) anfallen. Diese mit relativ geringem Aufwand durchzuführenden Arbeiten können i.d.R. ohne Zusatzinstrumentarium und spezielle Kenntnisse nach vorgegeben Anweisungen ausgeführt werden. Als Beispiel wird auf die FIG-PUBLICATION NR.9 (1994) hingewiesen, die Empfehlungen zur routinemäßigen Überprüfung von elektro-optischen Distanzmessern im Rahmen der Phase 1 und 2 bereitstellt. Ähnliche Anweisungen sind durch die Normenreihe DIN 18723 *Feldverfahren zur Genauigkeitsuntersuchungen geodätischer Instrumente* sowie die im Entwurf vorliegenden Normen ISO 17123 *Optics and optical instruments – Geodetic and surveying instruments – Field procedures for determining accuracy* auch für andere Instrumente vorgegeben.

Phase 3 beinhaltet den Bereich Kalibrierung. Er erfordert vertiefte Kenntnisse über das spezifische Verhalten eines Instrumententyps und ebenfalls besondere Einrichtungen oder Spezialinstru-

mentarium. Hier sollte auch die Rückführbarkeit der Gebrauchsnormale geregelt und gewährleistet sein. Das angewendete Verfahren muß in einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand durchzuführen sein und die Ergebnisse in einem Dokument / Zertifikat zusammenfassen.

Phase 4 definiert das umfangreiche Prüfen – wie es z.B. bei einer Abnahmeprüfung notwendig wird – aber auch das unabhängige Testen neuer Instrumententypen, um hieraus richtige und in ihrem Umfang angemessene Kalibrier- und Prüfverfahren, wie sie in den Phasen 1 bis 3 vorgesehen sind, zu entwickeln. Sie können sich auf einzelne Sensoren aber auch auf das Gesamtsystem beziehen. Häufig ist aber ohne die Kenntnis der Meßprinzipien und der verwendeten Software (intern) eine durchgreifende Prüfung nicht möglich oder sehr aufwendig. Dies steht oft im Gegensatz zu den kurzen Innovationszyklen, so daß eine neue Gerätegeneration auf dem Markt ist bevor die alte kalibriertechnisch beherrscht wird. Deshalb wird häufig der Weg einer System-Prüfung oder – Kalibrierung eingeschlagen. Dabei versucht man direkt das endgültige Meßergebnis mit Soll-Werten zu vergleichen. Obwohl die Erfahrungen auf Teilgebieten – wie z.B. der Untersuchung von Nivellier-Systemen (PIETSCH, 1992, HEISTER, 1994, REITHOFER ET AL., 1996 und RÜEGER AND BRUNNER, 2000) – weit fortgeschritten sind, verbleibt auf dem Gebiet der motorisierten, zielfindenden und zielverfolgenden Tachymetrie noch viel experimentelle Arbeit. Erste Ansätze hierzu liefern FISCHER (1998) und GOTTWALD (1998).

Für den Praktiker aber auch Experten ist das Vorgehen bei der Überprüfung und Kalibrierung von Meßsystemen zur Positionsbestimmung mit Hilfe des GPS nahezu ungeklärt. Hierbei wird geradezu beispielhaft der „black-box“ Effekt demonstriert: Die Entstehung des Produktes *Koordinate* (im Sinne ISO 9000 ff.) ist in den einzelnen Entwicklungsschritten nicht mehr nachvollziehbar und dabei das Zusammenwirken von Hard- und Software für den Nutzer nicht mehr trennbar. Neben einer Antennen-Kalibrierung, über die in CAMPBELL UND GÖRRES (1999) ausführlich berichtet wird, kann nur noch ein System-Test, der in anwendungsspezifisch eingerichteten Punktfeldern mit bekannten Referenzkoordinaten durchgeführt werden sollte, zu objektiven Aussagen führen (STEWART ET AL., 1998). Bei Meßabweichungen ist eine Trennung in Einzelkomponenten und eine eindeutige Zuordnung zur Sensorik, Mechanik oder Auswertung kaum möglich. Obwohl kein Meßsystem selbst in der Erprobungsphase sich so rasant in unterschiedlichen geodätischen Anwendungsbereichen etablieren konnte, sind dennoch die Vorschläge zur Überprüfung und Kalibrierung von GPS – Empfängern noch nicht ausgreift und praxisgerecht aufbereitet (BÄUMKER UND FITZEN, 1996, INGENSAND, 1997, LANDAU, 1998).

4. Genauigkeitsangaben bei Prüfung und Kalibrierungen

Die Vollständigkeit eines quantitativen Prüfergebnisses ist erst dann gegeben, wenn neben dem berichtigten *Meßergebnis* auch die *Meßunsicherheit* angegeben ist. Sie ist als quantitatives Genauigkeitsmaß in DIN 1319 definiert als der Kennwert, der aus Messungen gewonnen wird und zur Kennzeichnung des Wertebereiches für den wahren Wert der Meßgröße dient. Dieser wichtigen Forderung ist der Geodät schon immer durch die Zusammenführung von funktionalem und stochastischem Modell in statistischen Schätzverfahren nachgekommen. Wurden hierbei überwiegend die stochastischen Eigenschaften eines Meßprozesses berücksichtigt, die durch Angabe der *empirischen Standardabweichung* quantitativ beschrieben wird, so wird es zukünftig unumgänglich sein, auch systematische Einflüsse in die Genauigkeitsbetrachtungen mit einzubeziehen. Angesichts der ungleichen Behandlung über die Angabe der Meßunsicherheit in den verschiedenen metrologischen Disziplinen erteilte bereits 1977 das Comité International des Poids et Mesures (CIPM) dem Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) den Auftrag, mit den zuständigen nationalen Institutionen und Organisationen einen Leitfaden zur Angabe der Meßunsicherheit bei der Normung, Kalibrierung, Akkreditierung von Laboratorien und metrologischen Diensten zu erarbeiten. Der Zweck dieses Leitfadens sollte sein, vollständig darüber zu informieren, wie man zu Unsicherheitsangaben kommt, um eine Grundlage für den internationalen Vergleich aber auch für die gegenseitige Akzeptanz von Meßergebnissen zu gewährleisten. Dieser *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* liegt seit 1995 in seiner berichtigten Fassung vor. Diese ISO-Veröffentlichung (auch als DIN-Publikation erschienen) kann allen zum vertieften Studium empfohlen werden. Zu einer weiterführenden, geodätischen Betrachtung dieses Themas wird noch auf die

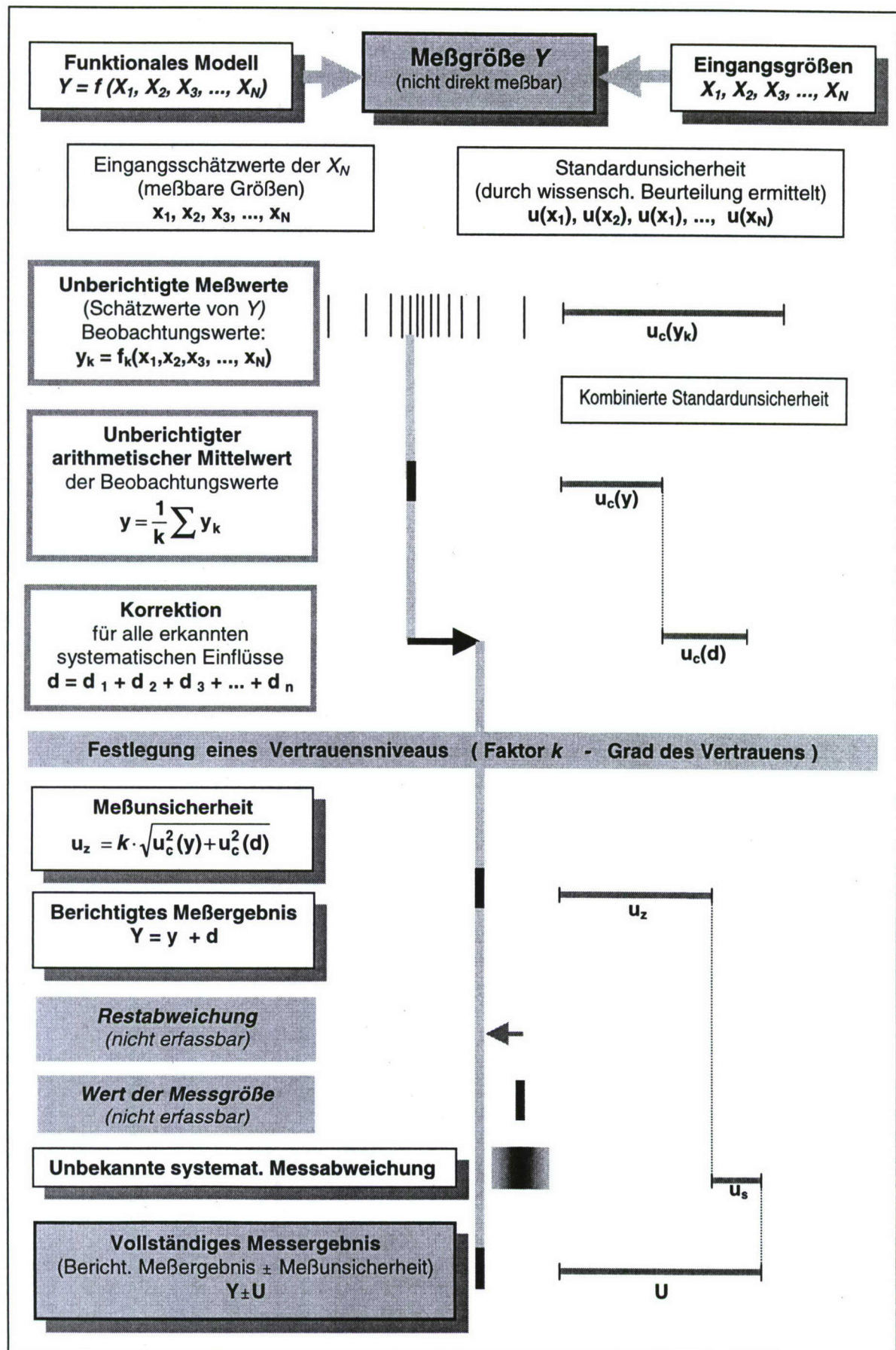


Abb. 5: Meßergebnis und Meßunsicherheit

Arbeiten von SCHMIDT (1994), (1997) hingewiesen.

Im Überblick läßt sich der Ablauf von der möglichst exakt zu definierenden Meßgröße Y bis hin zum vollständigen Meßergebnis $Y \pm U$ in der Abbildung 5 verfolgen. Grundsätzlich ist ohne eine unendliche Menge an Informationen die Definition der Meßgröße immer unvollständig und verursacht somit eine Unsicherheitskomponente.

Über eine endliche Menge an Eingangsgrößen X_N , deren Werte durch die (meßbaren) Größen x_N geschätzt werden, läßt sich über einen funktionalen Zusammenhang f der unberichtigte Meßwert y_k bestimmen. Seine Meßunsicherheit $u_c(y_k)$ wird entweder als empirische Standardabweichung aus Wiederholungsmessungen abgeleitet (Standardunsicherheit vom Typ A) oder aus den abgeschätzten Standardunsicherheiten $u(x_N)$ der Eingangsschätzwerte x_N über die Fehlerfortpflanzung berechnet (kombinierte Standardunsicherheit vom Typ B). Liegen Mehrfachmessungen (möglichst unabhängig) vor, so läßt sich der unberichtigte arithmetische Mittelwert y und sein Standardunsicherheit $u_c(y)$ angeben.

Alle systematischen und reproduzierbaren Meßabweichungen d_n , die erkannt werden können, sind als Korrektur d zu berücksichtigen und führen zum berichtigten Meßergebnis Y . Unter Berücksichtigung ihrer Standardunsicherheit $u_c(d)$ und unter der Festlegung eines Wertes k wird die erweiterte Meßunsicherheit u_z bestimmt. Sie kennzeichnet einen Bereich, von dem erwartet wird, daß er einen großen Teil der Verteilung der Werte umfaßt, die der Meßgröße zugeordnet werden können. In der Praxis wird häufig $k = 2$ vereinbart. Dieser Wert entspricht bei normalverteilten Beobachtungen einem Vertrauensniveau (Grad des Vertrauens) von 95%.

Nicht reproduzierbare oder nicht erkannte systematische Meßabweichungen (Modellfehler) verursachen eine nicht bestimmbare Restabweichung. Ihre Abschätzung erfordert meßtechnische Erfahrung und sollte durch den Wert u_s quantitativ möglichst realistisch beschrieben werden. Die Zusammenfassung - quadratisch oder linear - der zufälligen und systematischen Komponente - u_z und u_s - zur Meßunsicherheit U ermöglicht schließlich die Angabe des vollständigen Meßergebnisses $Y \pm U$.

Je höher die Meßhierarchie bei Prüfungen und Kalibrierungen angesiedelt ist, je detaillierter und aufwendiger werden die Nachweise und Informationen zur Bestimmung des vollständigen Meßergebnisses insbesondere der Meßunsicherheit. In den nachfolgenden Ebenen dieser Hierarchie müssen dann diese metrologischen Informationen vollständig verfügbar sein, damit die Bestimmung von Meßunsicherheiten korrekt fortgeschrieben werden können. Auf den unteren Ebenen schließlich stützt sich die Prüftätigkeit auf Kalibrier- und Prüfzertifikate, bereits erprobte Prüfanweisungen sowie nationale und internationale Normen.

5. Beispiel

Die Entwicklung der digitalen Nivelliersysteme veranschaulicht in übersichtlicher Weise, wie durch den Automatisierungsprozeß bei einem einfachen Meßinstrument die bewährten Prüfverfahren teilweise völlig neu zu überdenken sind. Einige bekannte systematische Fehlereinflüsse sind aber auch bei diesen neuen Geräten wiederzufinden, so daß ein Teil der konventionellen Prüfungen bzw. Korrekturen (Nullpunktsfehler der Latte, Kompensatorrestfehler, Ziellinienfehler etc.) wie bei herkömmlichen Nivelliergeräten anfallen. Somit können auch trotz des hohen Automatisierungsgrades die Prüfungen nach Phase 1 und 2 teilweise erhalten bleiben. Andere Einflüsse hingegen wie sie in STAIGER (1998), REITHOFER ET AL. (1996) oder RÜEGER AND BRUNNER (2000) diskutiert werden, veranlassen aber auch über Modifikationen und Ergänzungen nachzudenken.

Da insbesondere bei den neuen Geräten die visuelle Ablesung durch eine automatisierte Digitalisierung mit Hilfe der CCD-Sensorik an speziell codierten Latten ersetzt wurde, ist dem Anwender zunächst die gewohnte direkte metrische Zuordnung eines Skalenstriches nicht mehr möglich. Deshalb sind die Bedeutungen des mittleren oder durchschnittlichen Lattenmeters, der Strichverbesserung zu hinterfragen und die damit verbundenen Prüfverfahren neu zu definieren. Auf diese der Phase 3 zuzuordnenden Kalibrierungen soll deshalb am Beispiel der Nivelliere Zeiss DiNi näher eingegangen werden. Die Beschränkung auf einen Typ ist deshalb notwendig, da zum einen die Latten verschiedener Hersteller unterschiedliche Codes und Auswerteverfahren benutzen, zum anderen die Informationen hierüber mehr oder weniger offengelegt sind.

Dem originären Begriff der Kalibrierung folgend ist hierfür der Zusammenhang zwischen dem Meßwert – der digitalen Höhe – und seinem Sollwert herzustellen. Dies führt zu einer System-Kalibrierung, wie sie bereits von PIETSCH (1992), REITHOFER (1993) und HEISTER (1994) vorgeschlagen und durchgeführt wurde. Andererseits wird für die Nivellierlatte nach DIN 18703 (1996) oder DIN 18717 (1996) eine Grenzabweichung für einen beliebigen Teilungsabschnitt festgelegt. Hierbei können dann die bewährten und automatisierten Verfahren der Lattenkalibrierung eingesetzt werden, wie sie z.B. von SCHLEMMER (1975), HEISTER ET AL. (1986) und MAURER, SCHNÄDELBACH (1983) beschrieben und praktiziert wurden.

Es erhebt sich hieraus sofort die Frage, welche der beiden Verfahren für eine sachgerechte Kalibrierung sinnvoll und anzuwenden ist. Sowohl für den im Rahmen eines QMS für Meßmittel verantwortlichen Mitarbeiters als auch für den innerhalb eines Kalibrierlabors tätigen qualifizierten Prüfsachverständigen läßt sich diese Frage nicht ohne detaillierte Kenntnisse um den Meßprozess und/oder umfangreiche Untersuchungen (Phase 4) beantworten. Die in *Anlage 1* detailliert dargestellte Methode zur Gewinnung der Höhenablesung im DiNi läßt folgende Schlußfolgerungen zur Konzeption eines Kalibrierverfahrens zu:

- ⇒ Der Maßstab der Code-Latte wird festgelegt durch die Bit-Breite von 2 cm. Anschaulich und in gewohnter Terminologie könnte man von einer „2 cm-Latte“ sprechen. Die über den Code identifizierte Numerierung eines Bits führt durch Multiplikation mit seiner Breite (2 cm) direkt zur Groablesung. D.h. eine Maßstabsabweichung verursacht durch die Bit-Breite geht direkt als Maßstabsfehler in die digitale Ablesung ein. Andererseits hat hierbei der Abbildungsmaßstab – hervorgerufen durch die Optik des Nivelliers – keinen Einfluß.
- ⇒ Bei der Feinablesung hingegen werden aus den Bildkoordinaten der Bits Bildmaßstab M_b und der digitale metrische Wert als Zuschlag zur Groablesung abgeleitet. Sowohl Maßstabsfehler der Lattenteilung als auch der Abbildung werden in M_b verschmolzen. Da es sich jedoch *immer* um einen numerisch kleinen Wert (Lattenausschnitt) handelt ist die Genauigkeit von M_b zweitrangig. Selbst ein Maßstabsfehler von 100 ppm würde die Feinablesung um weniger als 0.02 mm verfälschen.
- ⇒ Eine Kalibrierung der Code-Latte in gewohnter Weise (Vergleich der Ist- und Soll-Strichlagen bzw. Code-Muster) führt zu einem repräsentativen Wert m_{CT} des Lattenmaßstabes. Weiterhin lassen sich für alle Striche die Grenzabweichungen gemäß DIN 18717 berechnen. Als globales Genauigkeitsmaß kann zusätzlich aus diesem Vergleich die Meßunsicherheit der Code-Teilung u_{CT} angegeben werden.
- ⇒ Eine Strichverbesserung hat keine Bedeutung, da sie metrisch einem Höhenwert nicht zugeordnet werden kann.
- ⇒ Eine System-Kalibrierung, die durch den direkten Vergleich der digitalen Ablesung im Nivellier und seines entsprechenden Soll-Wertes gekennzeichnet ist, führt bei genügend großer Redundanz ebenfalls zu einem repräsentativen Wert m_H des Maßstabes der Höhenablesung. Als globales Genauigkeitsmaß kann die Meßunsicherheit für eine digitale Höhenablesung angegeben werden.
- ⇒ Die aus den zwei unterschiedlichen Kalibrierverfahren abgeleiteten Maßstäbe m_{CT} und m_H müssen innerhalb ihrer Meßunsicherheiten übereinstimmen.
- ⇒ Eine Angabe der Grenzabweichungen für die Codestrich-Lage gemäß DIN 18717 läßt sich bei der System-Kalibrierung nicht angeben.

Sowohl Lattenkalibrierung als auch System-Kalibrierung haben Vor- und Nachteile, die auch in RÜEGER AND BRUNNER (2000) eingehend diskutiert werden. Zur Zeit laufen umfangreiche experimentelle Untersuchungen, die hierüber gesicherte und repräsentative Aussagen für die heute auf

dem Markt befindlichen digitalen Nivelliersysteme ermöglichen werden. Deshalb soll an dieser Stelle auf die angeschnittene Problematik nicht weiter eingegangen werden.

UNSICHERHEITS-QUELLE	EINGANGS-GRÖSSE X_i	STANDARD-UNSICHERHEIT u_c [μm]	SYSTEMATISCHE MESSABWEICHUNG u_s [μm]	U_{x_i} [μm]
Laser-Interferometer <ul style="list-style-type: none"> Wellenlänge Brechungsindex Totwegfehler Cosinusfehler 	$\lambda/4$ λ_0 dn f_t dz	$0,2 + 0,2 \cdot L$	$0,3$ $0,3$ $0,1$	$0,5 + 0,2 L$
Meßunsicherheit U_L				
Komparator <ul style="list-style-type: none"> Unterbau Zeitl. Veränderungen durch versch. Umwelteinflüsse Meßschlitten Mechan. Fehlverhalten 	dL_T dL_M		$0,0$ $0,2$	$0,2$
Meßunsicherheit U_K				
Photoelektr. Strichfassung <ul style="list-style-type: none"> Beobachtungsrichtung Zufällige Meßabweichungen (Kanteneinfang) 	dL_B	$0,3$	$0,2$	$0,4$
Meßunsicherheit U_{ST}				
Prüfling <ul style="list-style-type: none"> Ausdehnungskoeffizient Temperatur Fehlausrichtung Auflagerung 	$d\alpha$ dT dL_F dL_{GP}	$0,2$	$0,2 \cdot L$ $0,2 \cdot L$ $0,1$ $0,0$	$0,2 + 0,3 L$
Meßunsicherheit U_P				
Meßunsicherheit U_L repräsentativ für den photoelektrischen. Kanteneinfang bei einer Meßlänge L				$0,7 + 0,4 L$
Meßunsicherheit $U_{L=3m}$				$1,9$

Tabelle 1: Überblick der Komponenten zur Bestimmung der Meßunsicherheit bei der interferometrischen Kalibrierung von Code-Latten

Wie im vorangegangenen Abschnitt bereits dargelegt, ist zur Angabe eines vollständigen Kalibrierergebnisses ist auch die Feststellung seiner Meßunsicherheit notwendig. Konkret sollen deshalb am Beispiel des Präzisionslängenkomparators des Geodätischen Instituts der UniBw M, in der Meßanordnung wie in HEISTER (1987) beschrieben, die einzelnen Einflußgrößen und Unsicherheiten zusammengestellt werden. Die errechnete bzw. abgeschätzte und zusammengefaßte Meßunsicherheit ist dann bei der Auswertung der Kalibriermessungen, z. B. eine Regressionsanalyse zur Maßstabsbestimmung, als a priori Genauigkeitsinformation einzuführen, um die Genauigkeits-schätzung der Parameter zu verbessern. Hierdurch kann schließlich das vollständige Kalibrierergebnis, das die Berechnung der Meßunsicherheit einschließt, so wie es die einschlägigen metrologischen Richtlinien verlangen, korrekt und verantwortungsbewußt angegeben werden. Ein Beispiel über die formale Abfassung eines Kalibrierzertifikates nach den Vorgaben der WECC ist in der Anlage 2 wiedergegeben.

6. Ausblick und Empfehlungen

Die vorangegangenen Ausführungen machen deutlich, daß es im wesentlichen zwei Gründe gibt, die einerseits ein Überdenken und die Neugestaltung alter, bewährter Prüfverfahren angeregt haben, andererseits aber auch die Erarbeitung völlig neuer Konzepte zur Überprüfung geodätischer Instrumente erfordern:

1. Neue Technologien haben Funktionsprinzipien, Meßmöglichkeiten und Bedienung geodätischer Meßmittel von Grund auf vollständig geändert.
2. Ein modernes Qualitätsmanagementsystem (QMS) umfaßt auch ein Bestätigungssystem für Meßmittel, das dokumentierte Anweisungen für einfache Feld-Prüfverfahren bis hin zu verbindlichen Empfehlungen und Hinweisen für Zeitintervalle und hochwertige Laborkalibrierungen erfordert.

Um neue Konzepte und Normen für wirtschaftlich vertretbare aber auch instrumentell wirksame Prüfverfahren zu erarbeiten, sind folgende Voraussetzungen zu schaffen:

- Die Kette von der Definition der Meßgröße über die Eingangsgrößen, dem unberichtigten Meßwert bis zum vollständigen Meßergebnis ist vom Hersteller offenzulegen; im Einklang mit den Empfehlungen der CIPM sind alle metrologischen Informationen zur Bestimmung der Meßunsicherheit dem Anwender zu übergeben (Referenz-Handbuch).
- Das Meßinstrument sollte auf einfache Weise jederzeit in eine klar dokumentierte Basis-Konfiguration versetzt werden können.
- Einer benutzerfreundlichen Bedienung zur Vermeidung ungewollter Meßoperationen ist bei der Entwicklung hohe Priorität einzuräumen.
- Für den Anwender sind abgestufte (Vier-Phasen-Modell), effektive und wirtschaftliche Prüf- und Kalibrierverfahren zu erarbeiten; diese Aufgabe ist vorrangig von Herstellern, Hochschulinstituten oder anderen auf diesem Gebiet qualifizierten Institutionen zu erfüllen.
- Entsprechend anderer metrologischer Fachrichtungen sind auch Laboratorien zu akkreditieren, die auf Kalibrierung und umfangreiche, Tests geodätischer Meßinstrumente spezialisiert sind, wodurch nachweislich die Rückführbarkeit der Normale gewährleistet ist. Weiterhin können dann akkreditierte Laboratorien Prüf-Zertifikate ausstellen, die im Einklang mit der WECC stehen und somit international anerkannt werden.

Diese Bemerkungen und Hinweise mögen die Diskussion um Prüfverfahren zwischen Hersteller, Experten und Praktikern anregen mit dem Ziel, eine metrologische Infrastruktur mit hoher Fachkompetenz aufzubauen und möglichst aktuelle und einschlägige Richtlinien zu schaffen, die einem modernen Bestätigungssystem für Meßmittel innerhalb eines QMS entsprechen, das in der Praxis Akzeptanz und Anwendung findet.

7. Literaturverzeichnis

- BÄUMKER, M. UND FITZEN, H.-P. (1996): *Permanente Überwachungsmessungen mit GPS*. In: Brandstätter/Brunner/Schelling(Hrsg.): *Ingenieurvermessung 96*, Ferd. Dümmler's Verlag, Bonn, p. B7/1 – B7/12
- CAMPBELL, J. UND GÖRRES, B. (HRSG.)(1999): *Workshop zur Festlegung des Phasenzentrums von GPS-Antennen*. Proceedings, Geodätisches Institut der Universität Bonn, Bonn
- DUTSCHKE, W. (1990): *Prüfmittelüberwachung in Kalibrierketten*. VDI-Z, Nr. 5, S. 107 - 112
- FEIST, W., GÜRTLER, K., MAROLD, T., ROSENKRANZ, H. (1995): *Die neuen Digitalnivelliere DiNi10 und DiNi20*. Vermessungswesen und Raumordnung (VR), Vol. 57/2, p. 65 - 78
- FISCHER, E.-N.(1998): *Prüfung elektronischer Sensorsysteme bei elektronischen Tachymetern*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), p. 374 – 378.
- GOTTWALD, R. (1998): *Prüfung und Kalibrierung von Vermessungsinstrumenten*. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, p. 409 – 413.
- HEISTER, H., CASPARY, W., TILLE, R.(1986): *Problems in Reading the Graduation Lines on Levelling Rods by Photo-electric Methods*. In: PELZER H., NIEMEIER W. (HRSG.): *Precise Levelling*. Dümmlers Verlag, Bonn, p.127 - 140
- HEISTER, H.(1987): *Zur automatischen Kalibrierung geodätischer Längenmeßinstrumente*. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 27.
- HEISTER, H.(1994): *Zur Überprüfung von Präzisions-Nivellierlatten mit digitalem Code*. In: Brunner K., Peipe J. (Hrsg.): *Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer zum 60. Geburtstag*. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 46, p. 95 - 101
- HEISTER, H. (1996): *Qualitätssicherung und Kalibrierung geodätischer Meßmittel*. In: Brandstätter/Brunner/Schelling(Hrsg.): *Ingenieurvermessung 96*, Ferd. Dümmler's Verlag, Bonn, p. C2/1 – C2/9
- HEISTER, H.(1997): *Hybride Vermessungssysteme*. In: 81. Deutscher Geodätentag 1997 in Karlsruhe, Deutscher Verein für Vermessungswesen Schriftenreihe, Vol.27, p. 271 – 275.
- HENNES, M (1998): *Tachymeter – Technologien, Instrumentenfehler, Kalibrierung*. Paper presented at DVW- AK 5 Workshop, Febr. 16./17., Darmstadt.
- INGENSAND, H.(1997): *Neue Verfahren zur Zertifizierung geodätischer Messinstrumente*. In: IX. Internationale Geodätische Woche Obergurgl, Institutsmitteilungen der Universität Innsbruck – Geodätisches Institut, Heft Nr. 17, p. 93 - 107
- LANDAU, H. (1998): *Zur Qualitätssicherung und Vernetzung von GPS-Referenzstationen*. Vermessungswesen und Raumordnung (VR), Vol. 60/8, p. 438 – 445.
- MAURER, W. UND SCHNÄDELBACH, K. (1983): *First Experiences with a Vertical Comparator for the Calibration of Invar Rods*. In: PELZER H., NIEMEIER W. (HRSG.): *Precise Levelling*. Dümmlers Verlag, Bonn, p.155 - 163
- PIETSCH, U. (1992): *Untersuchungen zur Systemgenauigkeit der automatisierten digitalen Nivelliere NA2000/NA3000*. Diplomarbeit, Institut für Geodäsie (unveröffentlicht).
- REITHOFER, A., HOCHHAUSER, B., BRUNNER, F.K. (1996): *Calibration of Digital Levelling Systems*. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), Vol.84, p. 284 – 289
- RÜEGER, J.M. AND BRUNNER F.K. (2000): *On the System Calibration and Type Testing of Digital Levels*. Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), im Druck
- SCHLEMMER, H. (1975): *Laser-Interferenzkomparator zur Prüfung von Präzisions-Nivellierlatten*. DGK Reihe C, Heft 210, München
- SCHMIDT, H. (1994): *Meßunsicherheit und Vermessungstoleranz bei Ingenieurvermessungen*. Veröffentlichungen des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen, Nr. 51
- SCHMIDT, H. (1997): *Was ist Genauigkeit? Zum Einfluß systematischer Abweichungen auf Meß- und Ausgleichungsergebnisse*. Vermessungswesen und Raumordnung (VR) 59
- STAIGER, R. (1998): *Zur Überprüfung moderner Vermessungsgeräte*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), p. 365 – 372.
- STEWART, M., TSAKIRI, M., MARTIN, D., FORWARD, T.(1998): *Traceability and Calibration of Satellite Positioning Systems*. Survey Review, Vol. 34, 269, p 437 – 446.

NORMEN:

- DIN 1319 – 1 (1995): *Grundlagen der Meßtechnik, Teil 1: Grundbegriffe.*
- DIN 1319 – 2 (1980): *Grundlagen der Meßtechnik, Teil 2: Begriffe für die Anwendung von Meßgeräten.*
- DIN 1319 – 3 (1996): *Grundlagen der Meßtechnik, Teil 3: Auswertungen von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit.*
- DIN 1319 – 4 (1997): *Grundbegriffe der Meßtechnik, Teil 4: Behandlung von Unsicherheiten bei der Auswertung von Messungen.*
- DIN ISO 8402 (1992): *Qualitätsmanagement und Qualitätssicherung - Begriffe.*
- DIN EN ISO 9000-1, ... , 4 ff. (1994): *Normen zum Qualitätsmanagement und zur Qualitätssicherung/ QM-Darlegung.*
- DIN EN ISO 9001 (1994): *Qualitätsmanagementsysteme - Modell zur Qualitätssicherung / QM-Darlegung in Design, Entwicklung, Produktion, Montage und Wartung.*
- DIN EN ISO 9004-1(1994): *Qualitätsmanagement und Elemente eines Qualitätsmanagementsystems*
- DIN ISO 10012-1(1992): *Forderungen an die Qualitätssicherung für Meßmittel – Bestätigungssystem für Meßmittel.*
- DIN 18723 – 1, ..., 8 (1990): *Feldverfahren zur Genauigkeitsuntersuchung geodätischer Instrumente.*
- DIN 18703 (1996): *Nivellierlatten.*
- DIN 18717 (1996): *Präzisions-Nivellierlatten.*
- DIN EN 45001 (1990): *Allgemeine Kriterien zum Betreiben von Prüflaboratorien.*
- DIN EN 45002 (1990): *Allgemeine Kriterien zum Begutachten von Prüflaboratorien.*
- DIN EN 45003 (1995): *Akkreditierungssysteme für Kalibrier- und Prüflaboratorien.*
- ISO 12857- 1, ..., 4 (1999): *Optics and optical instruments – Geodetic and surveying instruments – Field procedures for determining accuracy. (Entwurf)*

TECHNISCHE MONOGRAPHIEN:

- DIN (1995): *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen.* Beuth Verlag, Berlin
- DKD-1 (1994): *Ziele, rechtliche Grundlagen, Akkreditierungskriterien und -verfahren, Organisationsstruktur und Publikationen des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD).* Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
- DKD-2 (1993): *Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien - Kriterien und Verfahren.* Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
- DKD-6 (1993): *Leitfaden zur Erstellung eines Qualitätssicherungs-Handbuches für Kalibrierlaboratorien des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD).* Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
- DVW (1996): *Qualitätshandbuch für ein Qualitätssicherungssystem im Vermessungswesen.* Schriftenreihe des DVW, Band 21, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart
- FIG-PUBLICATION (1994): *Recommended Procedures for Routine-Checks of Electro-Optical Distance Meters (EDM).* FIG Technical Monograph No. 9., Canberra, Australia
- ISO (1995): *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.* International Organization for Standardization, Genève

Anlage 1: Prinzip der digitalen Ablesung beim Zeiss DiNi

Das digitale Nivelliersystem von Zeiss benutzt zur Höhenablesung an der Latte zwei verschiedene, entfernungsabhängige Codes. Der Standardcode wird im Bereich einer Zielweite von 3 m bis 100 m benutzt, der Nahbereichscode von 1,2 m bis 4 m. Es handelt sich bei beiden um einen Zufallscode, der eine absolute und eindeutige Höhenablesung ermöglicht. Anhand einer schriftlichen Information der Firma ZEISS (1994) wird nachfolgend das *Prinzip* zur Bestimmung der *digitalen Höhenablesung* näher erläutert. Alle Einzelheiten waren dabei nicht zu klären, dennoch können insbesondere für die Lattenkalibrierung wichtige Erkenntnisse entnommen werden.

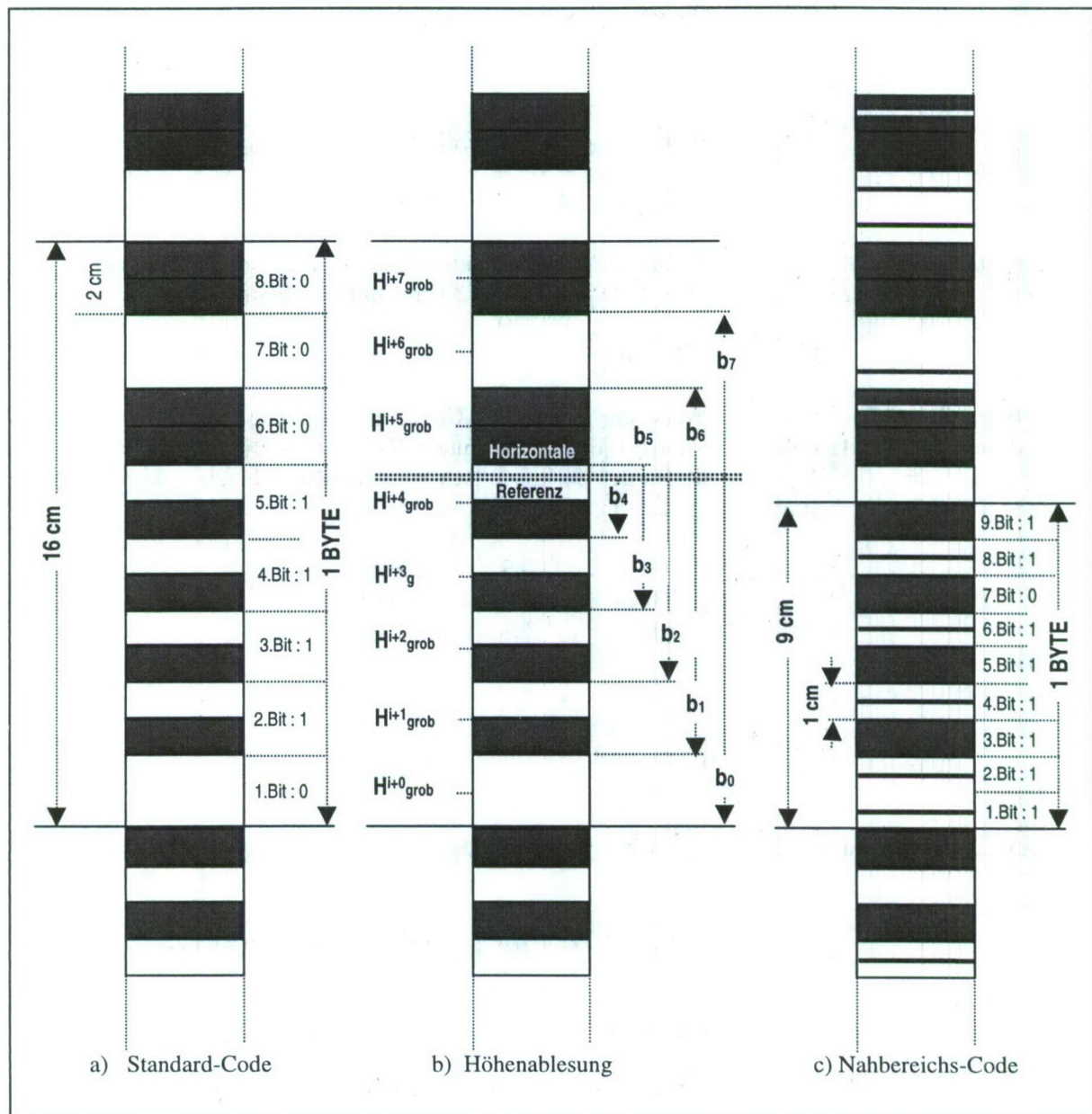


Abb. 6: Latten-Code des Zeiss DiNi

Der Standard-Code ist ein Binär-Code, wobei 8 Bits 1 Byte bzw. Codewort bilden. Jedes Bit ist 2 cm breit und besteht aus zwei gleich großen Teilen, je 1 cm breit. Somit lassen sich Bits bilden, die einerseits aus identischen Feldern bestehen - entweder weiß/weiß oder schwarz/schwarz -, andererseits unterschiedliche Felder bilden - weiß/schwarz oder schwarz/weiß (s. Abb. 6 a)). Das „Eins“-Bit ist einheitlich schwarz oder weiß, das „Null“-Bit entsprechend schwarz/weiß oder weiß/schwarz. Somit

ist es möglich über die gesamte Lattenlänge unterschiedliche Codeworte aufzubringen, die bei Projektion auf die im Nivellierinstrument befindliche CCD-Zeile durch Kantendetektion und anschließender A/D-Wandlung eindeutig bestimmt werden können. Der Auswertebereich in der Bildebene entspricht einem Lattenausschnitt von 30 cm, so daß immer ein vollständiges Byte i ausgewertet werden kann. Hierdurch ist es weiterhin möglich, jedem Bit B_{i+n} eine laufende Zahl zuzuordnen, z.B. 0,1,2, ..., 149 bei einer 3m-Latte. Ist die Zuordnung eindeutig erfolgt, kann innerhalb des Ausschnitts für jedes der n Bits ($n = 0,1,2, \dots, n$) eine Groablesung erfolgen(s Abb. 6 b)):

$$\begin{aligned} H_{\text{grob}}^{i+0} &= 2,0 \cdot (B_i + 0,5) \quad [\text{cm}], \\ H_{\text{grob}}^{i+1} &= 2,0 \cdot (B_{i+1} + 0,5) \quad [\text{cm}], \\ H_{\text{grob}}^{i+2} &= 2,0 \cdot (B_{i+2} + 0,5) \quad [\text{cm}], \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ H_{\text{grob}}^{i+n} &= 2,0 \cdot (B_{i+n} + 0,5) \quad [\text{cm}]. \end{aligned}$$

Alle Groablesungen entsprechen demnach der Mittellage des jeweiligen Bits.

Die Feinalesung erfolgt durch Interpolation und Mittelbildung ebenfalls unter Verwendung aller n Bits. Zunächst wird der Bildmaßstab aus den Randbits des 30 cm Bildausschnitts berechnet:

$$M_b = 2,0 \cdot n \cdot (b_n - b_0)^{-1},$$

wobei b_0 und b_n Ablesungen in der Bildebene (bzw. auf CCD-Zeile), bezogen auf die optische Achse (bzw. Referenzpixel) darstellen; dabei wird jeweils die untere Kante eines Bits angehalten. Werden jetzt alle $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ Ablesungen gebildet, so lassen sich zu den entsprechenden Groablesungen folgende n ($0,1,2, \dots, n$) Feinalesungen bestimmen:

$$\begin{aligned} H_{\text{fein}}^{i+0} &= M_b \cdot (b_1 + b_0) \cdot 0,5 \quad [\text{cm}], \\ H_{\text{fein}}^{i+1} &= M_b \cdot (b_2 + b_1) \cdot 0,5 \quad [\text{cm}], \\ H_{\text{fein}}^{i+2} &= M_b \cdot (b_3 + b_2) \cdot 0,5 \quad [\text{cm}], \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ H_{\text{fein}}^{i+n} &= M_b \cdot (b_n + b_{n-1}) \cdot 0,5 \quad [\text{cm}]. \end{aligned}$$

Für jedes der n Bits läßt sich nun ein Höhenwert, bezogen auf das Referenzpixel (optische Achse) bilden:

$$H^{i+n} = H_{\text{grob}}^{i+n} - H_{\text{fein}}^{i+n} \quad [\text{cm}], \quad \text{für alle } n = 0,1,2, \dots, n.$$

Die endgültige Höhenablesung ergibt sich dann als Mittelwert der zusammengefaßten Einzelwerte:

$$H = [H^{i+0} + H^{i+1} + H^{i+2} + \dots + H^{i+n}] / (n+1) \quad [\text{cm}].$$

Der Nahbereichs-Code besteht aus 9 Bits je Byte, wobei dann ein Bit 1 cm breit ist. Hierbei ist das „Null“-Bit entweder weiß oder schwarz mit einer 1 mm weißen Mittellinie. Das „Eins“-Bit ist entweder schwarz oder weiß mit einer 1 mm schwarzen Linie. Durch die Verkleinerung des Bytes auf 9 cm ist auch im Nahbereich bei eingeschränktem Gesichtsfeld ebenfalls eine eindeutige Bestimmung des Codewortes möglich. Die Auswertung zur Höhenablesung kann dann nach dem gleichen Verfahren wie beim Standardcode erfolgen. Die überlagerte Darstellung der beiden Codes in Abb. 6 c) ergibt das bekannte Bild der Zeiss-Code-Nivellierlatte.

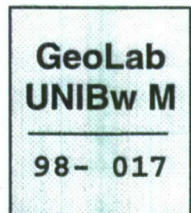
Anlage 2: Muster eines WECC-konformen Kalibrierzertifikates

Universität der Bundeswehr München
 Institut für Geodäsie - Geodätisches Labor
 D-85577 Neubiberg – Werner- Heisenberg-Weg 39



Kalibrierschein
 Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
 Calibration mark



Gegenstand Object	Invar-Strichodelatte	
Hersteller Manufacturer	Carl Zeiss, D-07740 Jena	
Typ Type	LD 13, 3 m	
Fabrikate/Serien Nr.	Serial number	Strichodelatte: Inv.-Nr.: Z15439
Auftraggeber Customer	Mustermann GmbH - Ing. Büro für Präzisionsvermessung D-471147 Prüfstadt	
Auftragsnummer Order No.	Bestell-Nr.: UniBwM/98-017	
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines Number of pages of the certificate	5	
Datum der Kalibrierung Date of calibration	06.11.98 (<i>letzter Tag der Kalibrierung</i>)	

Dieser Schein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge und Änderungen bedürfen der Genehmigung des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums.
 Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.
 This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the issuing laboratory.
 Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel Seal	Datum Date	Leiter des Kalibrierlaboratoriums Head of the calibration laboratory	Bearbeiter Person responsible
------------------------	----------------------	--	---

(Raum für weitere Angaben)

Datum: 17.08.99

Seite 2 von 5

Kalibrierzeichen

**GeoLab
UNIBw M****98- 017****Kalibriergegenstand:**

Invar-Strichcodelatte 3m
Sonderausführung: Alu-Gehäuse mit Einhängevorrichtung am
Lattenkopf zum Gebrauch als Hängelatte

Kalibrierverfahren:

Longitudinalkomparator mit feststehendem photoelektrischen Meßmikroskop und horizontaler Prüflingslagerung, automatisierter Vorschub und Meßablauf. Längenmessung mit Laserinterferometer HP 5507B, automatisierter Stricheinfang mit photoelektrischem Mikroskop Zeiss MPV Compact, Standardunsicherheit der Kantendetektion $0,7\mu + 0,4 L_{[m]} \mu$.

Meßbedingungen:

Der Prüfling wurde horizontal in den günstigsten Punkten gelagert. Aus dem Längsprofil (s. Abb. 2) können Durchhang und eventuelle Unregelmäßigkeiten entnommen werden. Das vorliegende Profil zeigt kein besonderes Fehlverhalten.

Die interferometrische Meßachse weicht um 10 cm aus der idealen Abbéschen Meßanordnung ab; eventuelle hierdurch verursachte Meßabweichungen sind in der o.a. Standardunsicherheit der Kantendetektion berücksichtigt.

Es wurden alle Code-Striche des Prüflings über die gesamte Länge von 3 m erfaßt.

Die Prüflingstemperatur entspricht der Lufttemperatur, da eine Akklimatisierungszeit von 24 Std. eingehalten wurde.

Die Bezugstemperatur der Kalibriermessungen beträgt 20° C. Bei der Korrektur der Meßergebnisse wurde ein Ausdehnungskoeffizient für Invar von 0,7 ppm berücksichtigt.

Bei der linearen Regression zur Maßstabsbestimmung wurden alle Beobachtungen gleichgewichtig unter Berücksichtigung einer mittleren Standardunsicherheit von 1,3 μ für die Kantendetektion eingeführt.

Umgebungsbedingungen:

Temperatur: $(21,6 \pm 0,2) ^\circ\text{C}$
Rel. Luftfeuchte: $(45 \pm 5) \%$
Luftdruck: $(980 \pm 1) \text{ hPa}$

Meßergebnis und Meßunsicherheit:

Die Meßunsicherheit der Code-Teilung (Code-Strich-Lage), berechnet aus den (Ist-Soll)-Differenzen der Vergleichsmessungen (s. a. Tabelle 1).

$$u_{CT} = \pm 9,7 \mu\text{m},$$

Maßstabsfaktor (Fehler) der Code-Teilung

$$m_{CT} = 1,000\,011\,5 \pm 0,000\,000\,2.$$

Datum: 17.08.99

Seite 3 von 5

Kalibrierzeichen

**GeoLab
UNIBw M****98- 017****Abweichung des fiktiven Skalen-Nullpunktes (Nullpunktsfehler) zur Aufsatzfläche**

$$k_{IST} = - 0,023 \text{ mm} \pm 0,008 \text{ mm},$$

$$k_{IST} \leq 0,05 \text{ mm (DIN 19717)}$$

(Positives Vorzeichen: Nullpunkt liegt innerhalb der Aufsatzfläche;
Negatives Vorzeichen: Nullpunkt liegt außerhalb der Aufsatzfläche)

Die angegebenen Meßunsicherheiten entsprechen dem zweifachen Schätzwert ihrer Standardabweichungen (Vertrauensniveau ~ 95%).

Alle Ergebnisse der Vergleichsmessungen sind in Tabelle 1 zusammengestellt und in den Abbildungen 1,2 graphisch dargestellt.

Konformitätsaussage:

Das Prüfergebn entspricht den Spezifikationen des Herstellers und den Anforderungen der DIN 18 717.

Datum: 17.08.99

Seite 4 von 5

Kalibrierzeichen

GeoLab
UNIBw M

98- 017

Tabelle 1: Mess- und Auswertergebnisse (Auszug)

Codestrich-Mitte (Ist) [mm]	Codestrich-Abweichung (Ist - Soll) [μm]	Codestrich-Mitte (Ist) [mm]	Codestrich-Abweichung (Ist - Soll) [μm]	Codestrich-Mitte (Ist) [mm]	Codestrich-Abweichung (Ist - Soll) [μm]
0,0000	0,0	237,7508	0,8	515,0040	4,0
5,4965	-3,5	252,7525	2,5	525,5018	1,8
22,7481	-1,9	262,7534	3,4	532,7555	5,5
42,7452	-4,8	275,0043	4,3	540,0032	3,2
52,7469	-3,1	285,5000	0,0	545,5032	3,2
62,7465	-3,5	292,7514	1,4	552,7539	3,9
82,7472	-2,8	310,0023	2,3	570,0063	6,3
92,7502	0,2	315,5002	0,2	577,7549	4,9
102,7508	0,8	322,7526	2,6	585,5043	4,3
112,7529	2,9	337,7499	-0,1	592,7541	4,1
122,7518	1,8	352,7531	3,1	610,0049	4,9
132,7523	2,3	362,7529	2,9	615,5053	5,3
142,7510	1,0	382,7530	3,0	622,7549	4,9
150,0026	2,6	397,7530	3,0	630,0034	3,4
155,4988	-1,2	422,7553	5,3	635,5036	3,6
162,7522	2,2	432,7565	6,5	642,7548	4,8
172,7495	-0,5	440,0073	7,3	652,7534	3,4
195,0011	1,1	445,5035	3,5	662,7535	3,5
205,5004	0,4	477,7564	6,4	672,7530	3,0
212,7506	0,6	492,7541	4,1	682,7530	3,0

Analyse der Stricherfassung (Hin- und Rückmessung):

Anzahl der erfaßten Codestriche: 263

Standardabweichung $S_0 = 1,4 \mu\text{m}$ Standardabweichung der Codestrich-Mitte: $S_{CM} = 1,0 \mu\text{m}$ Umkehrspanne: $US = -15,2 \mu\text{m}$ $S_{US} = 0,04 \mu\text{m}$ Maximale Grenzabweichung eines beliebigen Teilungsabschnittes: $\Delta l = 36 \mu\text{m} \leq \Delta l$ (DIN 18717)**Regressionsanalyse:**Steigung der Regressionsgeraden (Maßstab) $t = + 11,5 \text{ ppm}$ $S_t = 0,19 \text{ ppm}$

Datum: 17.08.99

Seite 5 von 5

Kalibrierzeichen

GeoLab
UNIBw M

98- 017

Abbildung 1: Graphische Darstellung der (Ist - Soll)-Differenzen der Strichteilung

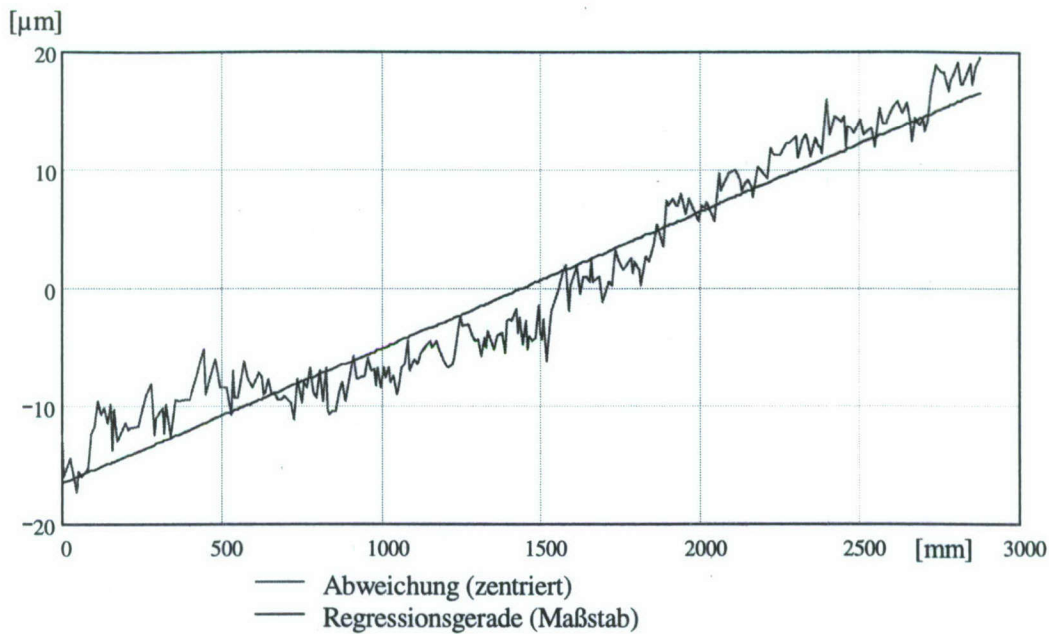
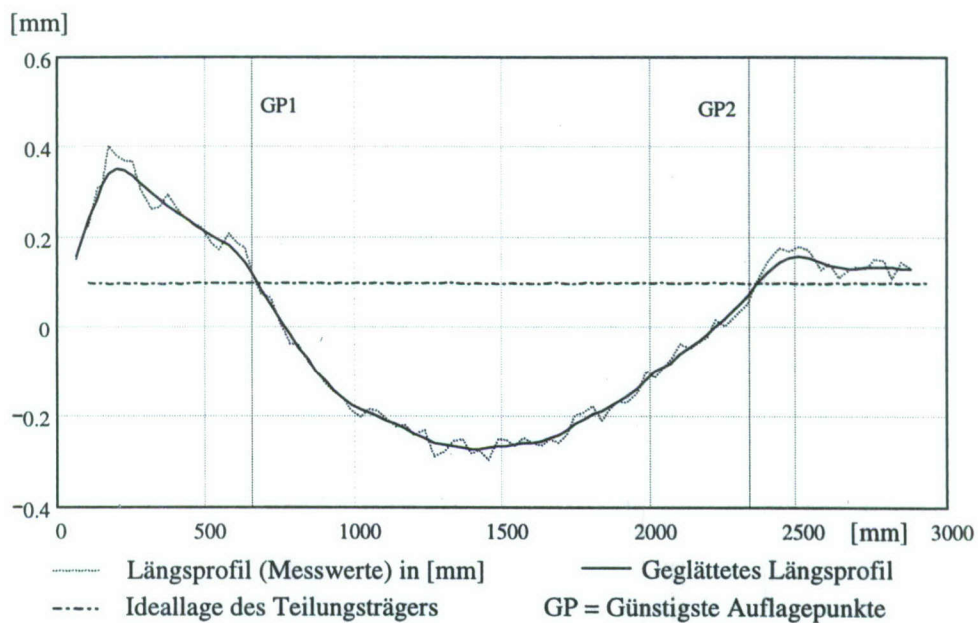


Abbildung 2: Längsprofil des Codestrich-Trägers



***Mathematica* Programme**
zur Darstellung des Zusammenhanges
von geographischer Breite
und
Meridianbogenlänge auf Rotationsellipsoiden

Klaus Krack

Universität der Bundeswehr München
Institut für Geodäsie
85577 Neubiberg

Zusammenfassung

Mathematica ist ein Computer Programm, das unter allen gängigen Betriebssystemen implementiert werden kann. Es vereinigt unter anderem symbolisches und numerisches Rechnen und ermöglicht eine strukturierte Dokumentation. *Mathematica* zählt im Moment sicher zu den modernsten Rechen- und Entwicklungshilfsmitteln in den Ingenieurwissenschaften. Mit *Mathematica* können Problemlösungen der Landesvermessung neu dargestellt werden.

Dies wird hier am Beispiel der bekannten Aufgabe " Berechnung der Meridianbogenlänge aus der geographischen Breite und umgekehrt" demonstriert.

Einführung

In der Landesvermessung hat die Darstellung des Rotationsellipsoides in Parameterform mit den Linien $u=gB$ (geographische Breite) und $v=gL$ (geographische Länge) als Bezugssystem eine herausragende Stellung, weil damit alle lagebezogenen vermessungstechnischen Problemstellungen eine Lösung finden.

Die Parameterlinien gB und gL dieses Koordinatensystems sind aber mit dem Defizit behaftet, daß sie durch Winkleinheiten bemessen sind, die zunächst keinen Bezug zu den metrischen Entfernungsangaben der Landmesser auf der Oberfläche des Rotationsellipsoides vermitteln.

Es stellt sich daher die Aufgabe, den Zusammenhang zwischen der richtungsmäßigen Festlegung zweier Punkte 1 und 2 und ihrem metrischen Abstand auf der Oberfläche des Ellipsoides darzustellen. Aus numerischer Sicht ist dies ein komplizierter Sachverhalt, insbesondere, wenn keine Einschränkungen bezüglich Rechengenauigkeit und Punktabstand gemacht werden sollen. Er vereinfacht sich aber für den Sonderfall, wenn die Punkte 1 und 2 auf ein und derselben Parameterlinie liegen. Dieser Sonderfall wird im folgenden betrachtet und mit *Mathematica* Programmen gelöst.

Auf den Parameterlinien gL eines Rotationsellipsoides gilt, wegen $gB=\text{constant}$, ein einfacher linearer Zusammenhang:

$$\Delta L = g L_2 - g L_1$$

$$\Delta L[m] = N[m] \cos(gB) \Delta L \text{ und } \Delta L[\text{rad}] = \Delta L[m] / N[m] \cos(gB)$$

mit $N[m]$ = Normalkrümmungshalbmesser in der geographischen Breite gB .

Auf den Parameterlinien gB gilt dagegen ein ungleich anspruchsvollerer Zusammenhang, der wie folgt zu beschreiben ist:

$$\Delta B = g B_2 - g B_1$$

$$\Delta B[m] = G[m] = \int M[m] dgB \text{ und } \Delta B[\text{rad}] = \int 1/M[m] dG$$

mit

$M[m]$ = Meridiankrümmungshalbmesser als Funktion der geographischen Breite gB

$G[m]$ = Meridianbogenlänge.

Die Möglichkeiten zur Lösung des Integrals $\int M[m] dgB$ wurden von vielen Autoren dargestellt, von denen eine Auswahl im Literaturverzeichnis aufgeführt ist. Hervorzuheben ist dabei insbesondere die Publikation von (Heck, 1987), in der verschiedene Verfahrensweisen einander gegenübergestellt werden.

Ganz neue Möglichkeiten zum Studium dieser Zusammenhänge bieten Programmsysteme zur symbolischen Algebra und zur automatisierten Formelmanipulation mit der zusätzlichen Möglichkeit die entwickelten Ausdrücke auch numerisch beliebig genau auszuwerten. *REDUCE*, *MAPLE* oder *Mathematica* stellen solche Programmsysteme dar, die in ihrer Anwendung auf PCs' unter einem Windows Betriebssystem einfach zu benutzen sind und ohne lästige Wartezeit ablaufen (Hearn 1968), (Wolfram 1992), (Kofler 1994). Für den interessierten Landvermesser und besonders für Geodäsiestudenten dürften diese Programmsysteme die im Moment modernsten Rechen- und Entwicklungshilfsmittel darstellen.

Mit diesen Programmsystemen ist es möglich, den Ansatz und Entwicklungsgang bekannter Lösungswege in einer leicht erlernbaren Notation zu formulieren, der weitgehend der Darstellung in der Fachliteratur folgen kann. Die weitere oft mühsame und fehleranfällige Entwicklungsarbeit übernimmt das Programmsystem und erschließt dem Nutzer in kürzester Zeit die Wirkungsweise der Algorithmen. Im weiteren verfügen die Programmsysteme über umfangreiche Programmbibliotheken, speziell auch zu numerischen Integrationsverfahren, was viele bekannte Entwicklungen in neuem Licht erscheinen läßt.

Die nachfolgenden Abschnitte zeigen am Beispiel von *Mathematica* Programmen, wie die beiden Aufgaben

"Berechnung der Meridianbogenlänge bei gegebener geographischer Breite " und umgekehrt mit *Mathematica* gelöst werden können.

Das vorliegende Script wurde ganz mit *Mathematica* 3.0 erzeugt. Für den noch wenig mit *Mathematica* vertrauten Leser sei angemerkt, daß in den nachfolgenden Textteilen die *Mathematica* relevanten Eingaben am Symbol *IN[]:=* zu erkennen sind. Alle anderen Textteile stellen Kommentare und Erläuterungen der Algorithmen dar. Alle durch *Mathematica* erzeugten Ergebnisse sind durch die Festschriftschrift *Courier 10* kenntlich gemacht.

Es werden folgende Ansätze vorgestellt:

[gB -> G]: Meridianbogenlänge als Funktion der geographischen Breite

1.1

Darstellung des Integrals $\int M dgB$ als trigonometrische Reihe, deren Koeffizienten nach Heitz (Heitz, 1985) abgeleitet werden. Umkehrung der Aufgabe durch iterative Anwendung der gefundenen Lösung.

1.2

Integration des Integrales $\int M dgB$ mit einer Funktion zur numerischen Lösung von elliptischen Integralen. Umkehrung der Aufgabe durch einen Fixpunktansatz.

1.3

Interpretation des Integrals $\int M dgB$ als geodätische Linie mit dem Azimut $A=0^\circ$ und numerische Integration über den als Hilfsparameter eingeführten Parallelkreishalbmesser nach Köhlein (Köhlein, 1962).

[G -> g B]: geographische Breite als Funktion der Meridianbogenlänge

2.1

Lösungsalgorithmus durch numerische Integration des Integrals $\int 1/M dG$ nach RungeKutta.

2.2

Numerische Integration nach Runge Kutta mit einem allgemeinen Ansatz zur Lösung der 1. geodätischen Hauptaufgabe auf Flächen in Gaußscher Parameterdarstellung und Spezialisierung auf die Koordinatenübertragung in einem Meridian.

1.1 Algorithmus nach Heitz

Die Meridianbogenlänge G wird üblicherweise als trigonometrische Reihe mit den Koeffizienten $a(i)$ und der geographischen Breite gB als Variable dargestellt. (Großmann, 1976).

$$G = a_0 gB + a_1 \sin(2 gB) + a_2 \sin(4 gB) + \dots$$

Die Koeffizienten $a(i)$ können hierin nach einem von Heitz angegebenen Bildungsgesetz (Heitz, 1985) direkt angeschrieben werden. Sie sind lediglich von zwei zur Ellipsoiddarstellung notwendigen Parametern, zum Beispiel Polkrümmungshalbmesser (cx) und zweite numerische Exzentrizität (e'), abhängig. Das in *Mathematica* unmittelbar umsetzbare Bildungsgesetz kann so allgemeingütig formuliert werden, daß die Koeffizienten $a(i)$ bis zu einer beliebigen Ordnungszahl (ewg) gebildet werden können. Danach läßt sich die trigonometrische Reihe als solche zusammenfügen und es können die Zahlenwerte der Koeffizienten für das gewünschte Rotationsellipsoid berechnet werden. Damit steht eine gebrauchsfertige Rechengleichung zu Verfügung.

Im nachstehenden Beispiel wird der Algorithmus bis zum Ordnungszahl $ewg = 6$ ausgeführt.

```
In[1]:= ewg = 6;
        Array a[ewg];
```

Der Koeffizient a_0 mit der Ordnungszahl 0 hat ein anderes Bildungsgesetz als die Koeffizienten der höheren Ordnungen. Er wird deshalb in einem eigenständigen Entwicklungsschritt gebildet. In den nachfolgenden Anweisungen erfolgt die Darstellung des Rotationsellipsoides mit cx (Polkrümmungshalbmesser) und e' (1. numerische Exzentrizität).

Die *Mathematica* Funktionen *Sum* und *Binomial* ermöglichen die direkte Umsetzung des Heitz'schen Bildungsgesetzes.

$$\text{In[3]} := a_0 = cx \left(1 + \sum_{n=1}^{ewg} 2^{-2n} \text{Binomial}\left[-\frac{3}{2}, n\right] \text{Binomial}[2n, n] e'^{2n} \right);$$

Die Koeffizienten $a(i)$ der Ordnung 1 bis zur Ordnung ewg werden, da sie dem gleichen Bildungsgesetz unterliegen, innerhalb einer Wiederholungsanweisung erzeugt.

```
In[4]:= Do[
        a[p] = 
$$\frac{cx \sum_{n=1}^{ewg} 2^{-2n} \text{Binomial}\left[-\frac{3}{2}, n\right] \text{Binomial}[2n, n-p] e'^{2n}}{p},$$

        {p, ewg}];
```

Die Koeffizienten $a(i)$ der trigonometrischen Reihe stehen nun als Funktion von cx und e' zur Verfügung und können ausgedruckt werden.

```
In[5]:= Print["a0 = ", a0];
Do[Print["a", i, " = ", a[i]], {i, ewg}];
```

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \\
 &cx \left(1 - \frac{3e'^2}{4} + \frac{45e'^4}{64} - \frac{175e'^6}{256} + \frac{11025e'^8}{16384} - \frac{43659e'^{10}}{65536} + \frac{693693e'^{12}}{1048576} \right) \\
 a_1 &= cx \left(-\frac{3e'^2}{8} + \frac{15e'^4}{32} - \frac{525e'^6}{1024} + \frac{2205e'^8}{4096} - \frac{72765e'^{10}}{131072} + \frac{297297e'^{12}}{524288} \right) \\
 a_2 &= \frac{1}{2} cx \left(\frac{15e'^4}{128} - \frac{105e'^6}{512} + \frac{2205e'^8}{8192} - \frac{10395e'^{10}}{32768} + \frac{1486485e'^{12}}{4194304} \right) \\
 a_3 &= \frac{1}{3} cx \left(-\frac{35e'^6}{1024} + \frac{315e'^8}{4096} - \frac{31185e'^{10}}{262144} + \frac{165165e'^{12}}{1048576} \right) \\
 a_4 &= \frac{1}{4} cx \left(\frac{315e'^8}{32768} - \frac{3465e'^{10}}{131072} + \frac{99099e'^{12}}{2097152} \right) \\
 a_5 &= \frac{1}{5} cx \left(-\frac{693e'^{10}}{262144} + \frac{9009e'^{12}}{1048576} \right) \\
 a_6 &= \frac{1001 cx e'^{12}}{8388608}
 \end{aligned}$$

Zusammenfügen der trigonometrischen Reihe

```
In[7]:= r = a0 gB + Sum[a[i] Sin[2 i gB], {i, 1, ewg}];
```

Als Rechenbeispiel wird nun hier und in allen nachfolgenden Abschnitten die Meridianbogenlänge vom Äquator bis zur Breite $gB = 48^\circ 13' 15.2891''$ auf dem Rotationellipsoid mit den Dimensionen von Bessel berechnet.

Die zur Zahlenrechnung notwendigen Ellipsoidparameter cx und e' werden aus der großen Halbachse ax und der Abplattung α des Rotationsellipsoides abgeleitet. Die Rechnungen werden mit einer Genauigkeit von 12 Ziffern durchgeführt.

Gegebene Ellipsoidparameter (Bessel):

```
In[8]:= ax = N[6377397.155, 12];
alpha = N[1/299.152802584, 12];
```

Abgeleitet Ellipsoidparameter:


```
In[9]:=  bx = N[ax - ax alpha, 12];
        cx = N[ $\frac{ax \ ax}{bx}$ , 12];
        e2 = N[ $\frac{ax \ ax - bx \ bx}{ax \ ax}$ , 12];
        e'2 = N[ $\frac{ax \ ax - bx \ bx}{bx \ bx}$ , 12];
        e' = N[ $\sqrt{e'2}$ , 12];
```

Umrechnungsfaktor Grad(dezimal) -> Radiant

```
In[10]:= rhod = N[ $\frac{180}{\pi}$ , 12];
```

Zahlenwert für die geographische Breite gBnum

```
In[11]:= gBnum = N[ $\frac{54 + \frac{13}{60} + \frac{15.2891}{3600}}{rhod}$ , 12];
        Print["gB = ", N[gBnum rhod, 12], "°"];
```

gB = 54.2209136389°

Die folgende Inline-Funktion *form* bewirkt, daß für Realzahlen mit dem Exponent <10 bei Print Anweisungen die Festkommadarstellung gewählt werden kann .

```
In[12]:= form = If[-10 < #1 < 10, Null, #1] &;
```

Rechengleichung für das Besselellipsoid:

```
In[13]:= Print["G[m] = ", N[r, 12]];
```

$$G[m] = 6.36674251987 \times 10^6 \text{ gB} -$$

$$15988.6390806 \sin[2. \text{ gB}] + 16.7299550485 \sin[4. \text{ gB}] -$$

$$0.0217848028165 \sin[6. \text{ gB}] + 0.0000307731358568 \sin[8. \text{ gB}] -$$

$$4.5323763964 \times 10^{-8} \sin[10. \text{ gB}] + 7.02675174479 \times 10^{-11} \sin[12. \text{ gB}]$$

Numerische Auswertung der trigonometrischen Reihe:

```
In[14]:= g = N[r /. gB -> gBnum, 12];
        Print["G = ",
        PaddedForm[g, {13, 3}, ExponentFunction -> form], "m"];
```

G = 6009883.942m

Umkehrung der Aufgabe:

Die Berechnung der geographischen Breite aus der Meridianbogenlänge wird mit einem iterativen

numerischen Verfahren durchgeführt. Ausgehend vom Näherungswert $b_i = G/ax$ wird die zu b_i streng gehörende Meridian bogenlänge r_i berechnet. b_i wird mit der Korrektur $dr = (G-r_i)/M$ solange verbessert bis die Differenz $G-r_i < 0.0005$ m ist.

Startwerte:

```
In[15]:= bi =  $\frac{g}{ax}$ ;
        dr = 1;
```

Iterationsschleife mit Prüfung der Abbruchbedingung am Schleifenanfang:

```
In[17]:= While[Abs[dr] > 0.0005,
  mi = N[ $\frac{ax(1-e^2)}{(1-e^2 \sin[bi]^2)^{3/2}}$ , 12];
  ri = a0 bi +  $\sum_{i=1}^{ewg} a[i] \sin[2 i bi]$ ;
  dr = g - ri;
  Print["Ablage (r-ri) = ", dr, " m"];
  db = N[ $\frac{dr}{mi}$ , 12];
  bi = N[bi + db, 12];
];
```

Ablage (r-ri) = 25257.6 m

Ablage (r-ri) = -0.478014 m

Ablage (r-ri) = -9.31323×10^{-10} m

Ergebnisausgabe:

```
In[18]:= Print["Geographische Breite aus Meridianbogenlänge: gB = ", N[bi rhod, 12], "°"];
```

Geographische Breite aus Meridianbogenlänge: gB = 54.2209136389°

1.2 Numerische Integration des elliptischen Integrals 3. Ordnung mit *EllipticPi*

Die differentielle Beziehung $dG = M dgB$ lässt sich als Funktion von gB wie folgt formulieren:

$$dG = ax (1 - e^2) / ((1 - e^2 \sin^2[gB]) \sqrt{(1 - e^2 \sin^2[gB])}) dgB$$

mit ax = große Halbachse, e = 1.numerische Exzentrizität

Diese Gleichung stellt ein elliptisches Integral 3.Ordnung dar, das in der gewählten Darstellungsform direkt in die *Mathematica*-Funktion *EllipticPi* eingesetzt und numerisch ausgewertet werden kann. Die Rechengenauigkeit soll 12 Ziffern betragen.

1.Schritt:

Definition der Funktion *gausb[gB_]*:

Berechne Meridianbogen aus geographischer Breite

```
In[1]:= gausb[gB_] := N[ax (1 - e2) EllipticPi[e2, gB, e2], 12];
```

Lösung der Umkehraufgabe:

Die Lösung der Umkehraufgabe wird durch einen Fixpunktansatz realisiert. Dazu ist es zunächst notwendig eine Funktion zur Berechnung des Meridiankrümmungshalbmessers zu definieren.

Die Funktion *m[gB_]* erfüllt diese Aufgabe in Abhängigkeit der geographischen Breite gB . Das Rotationsellipsoid wird durch den Polkrümmungshalbmesser cx und die 2. numerische Exzentrizität e' definiert.

2.Schritt:

```
In[2]:= m[gB_] := N[ $\frac{cx}{(1 + e'^2 \cos[gB]^2)^{3/2}}$ , 12];
```

3.Schritt:

Definition der Fixpunktgleichung *bausg[gB_]*:

Berechne geographische Breite aus Meridianbogen

```
In[3]:= bausg[gB_] := N[gB +  $\frac{\text{bogenlänge} - \text{gausb}[gB]}{m[gB]}$ , 12];
```

4.Schritt:

Definition der Funktion *bgl[gl_]* zur Auswertung der Fixpunktgleichung mit der *Mathematica*-Funktion *FixedPoint*.

```
In[4]:= bgl[gl_] := (bogenlänge = gl; FixedPoint[bausg, 0]);
```

Rechenbeispiel:

Gegebene geographische Breite gB_{num} :

```

In[5]:= ax = N[6377397.155, 12]; alpha = N[ $\frac{1}{299.152802584}$ , 12];

bx = N[ax - ax alpha, 12]; cx = N[ $\frac{ax \ ax}{bx}$ , 12];

e2 = N[ $\frac{ax \ ax - bx \ bx}{ax \ ax}$ , 12]; e'2 = N[ $\frac{ax \ ax - bx \ bx}{bx \ bx}$ , 12];

e' = N[ $\sqrt{e'2}$ , 12]; rhod = N[ $\frac{180}{\pi}$ , 12];

form = If[-10 < #1 < 10, Null, #1] &;

```

```

In[6]:= gBnum = N[ $\frac{54 + \frac{13}{60} + \frac{15.2891}{3600}}{rhod}$ , 12];

Print["gB = ", N[gBnum rhod, 12], "°"];

gB = 54.2209136389°

```

Berechnung der Meridianbogenlänge G:

```

In[7]:= meridianbg = gausb[gBnum];

Print["G =",

PaddedForm[meridianbg, {13, 3}, ExponentFunction -> form], " m"];

G = 6009883.942 m

```

Berechnung der Breite (berechnet aus der Meridianbogenlänge)

```

In[8]:= breitebg = N[bgl[meridianbg] rhod, 12];

Print["Geographische Breite aus Meridianbogenlänge gB = ",

breitebg, "°"];

```

Geographische Breite aus Meridianbogenlänge gB = 54.2209136389°

1.3 Numerische Integration über den Parallelkreishalbmesser nach Köhnlein

Ausgehend von den differentiellen Beziehungen einer geodätischen Linie und dem Satz von Clairaut formuliert Köhnlein (Köhnlein, 1962) auf dem Einheitsellipsoid ($ax=1$) die differentielle Beziehung

$$\frac{ds}{dp} = -p \sqrt{\frac{1-e^2 p^2}{(1-p^2)(p^2-pm^2)}}.$$

Mit

Länge der geodätischen Linie s

1. numerischen Exzentrizität e

Parallelkreishalbmesser $p = \cos(gB)$

Kennzahl $pm = p \sin(A)$ einer geodätischen Linie mit Azimut A in der Breite gB (Satz von Clairaut).

Betrachtet man nun den Meridianbogen als besondere geodätische Linie mit dem Azimut $A=0$, so vereinfacht sich der Differentialquotient wegen $pm = 0$ zu

$$\frac{ds}{dp} = -p \sqrt{\frac{1-e^2 p^2}{(1-p^2) p^2}}.$$

Der Quotient wächst für $p \rightarrow 1$ (Äquator) über alle Grenzen. Diese Unstetigkeitsstelle wird von der *Mathematica* Routine *NIntegrate* aber numerisch beherrscht, so daß bei der angestrebten Anwendung keine programmtechnischen Einschränkungen zu beachten sind.

Die Integrationsgrenzen lauten daher für einem Meridianbogen zwischen einem Punkte 1 auf dem Äquator und einem Punkt 2 auf dem Meridian in der Breite gB :

$p_1 = 1$ und $p_2 = \cos(gB)$.

Rechenbeispiel:

```
In[1]:= ax = N[6377397.155, 12]; alpha = N[ $\frac{1}{299.152802584}$ , 12];

bx = N[ax - ax alpha, 12]; cx = N[ $\frac{ax \ ax}{bx}$ , 12];

e2 = N[ $\frac{ax \ ax - bx \ bx}{ax \ ax}$ , 12]; e'2 = N[ $\frac{ax \ ax - bx \ bx}{bx \ bx}$ , 12];

e' = N[ $\sqrt{e'2}$ , 12]; rhod = N[ $\frac{180}{\pi}$ , 12];

form = If[-10 < #1 < 10, Null, #1] &;
```

Gegebene geographische Breite $gBnum$:

```
In[2]:= gBnum = N[ $\frac{54 + \frac{13}{60} + \frac{15.2891}{3600}}{\text{rhod}}$ , 12];
Print["B= ", N[gBnum rhod, 12], "°"];
B= 54.2209136389°
```

Berechnung der reduzierten Breiten beta und des Parallelkreishalbmessers p2 im Punkt 2:

```
In[3]:= beta2 = N[ArcTan[ $\frac{bx \text{ Tan}[gBnum]}{ax}$ ], 12];
p2 = N[Cos[beta2], 12];
```

Für die Kennzahl pm der geodätischen Linie mit dem Azimut gA=0 gilt:

```
In[4]:= pm = 0;
```

Numerische Integration zwischen p1 und p2:

```
In[5]:= sn = N[NIntegrate[-p  $\sqrt{\frac{1 - e^2 p^2}{(1 - p^2)(p^2 - pm^2)}}$ , {p, 1, p2},
WorkingPrecision -> 20], 12];
```

Ergebnis:

```
In[6]:= Print["G = ",
PaddedForm[sn ax, {13, 3}, ExponentFunction -> form], "m"];
G = 6009883.942m
```

Mit dem angegebenen Algorithmus können auch Meridianbogenabschnitte zwischen zwei beliebigen Breitenwerten berechnet werden.

Als Beispiel wird die Meridianbogenlänge zwischen den Breiten gB2 = 89° und gB3 = 90° berechnet:

```
In[7]:= gB2 = N[ $\frac{89}{\text{rhod}}$ , 12];
gB3 = N[ $\frac{90}{\text{rhod}}$ , 12];
Print["gB2= ", N[gB2 rhod, 12], "°"];
Print["gB3= ", N[gB3 rhod, 12], "°"];
beta2 = N[ArcTan[ $\frac{bx \text{ Tan}[gB2]}{ax}$ ], 12];
beta3 = N[ArcTan[ $\frac{bx \text{ Tan}[gB3]}{ax}$ ], 12];
gB2= 89.°
gB3= 90.°
```

Berechnung der Parallelkreishalbmesser p2 und p3 in den Breiten gB2 und gB3:


```
In[9]:= p2 = N[Cos[beta2], 12];
        p3 = N[Cos[beta3], 12];
```

Numerische Integration zwischen p2 und p3:

```
In[11]:= sd = N[NIntegrate[-p Sqrt[1 - e2 p^2 / ((1 - p^2) (p^2 - pm^2))], {p, p2, p3},
                    WorkingPrecision -> 20], 12];
```

Ergebnis:

```
In[12]:= Print["Meridianbogenabschnitt ΔG = ",
                PaddedForm[sd, {13, 3}, ExponentFunction -> form], "m"];
```

```
Meridianbogenabschnitt ΔG =      111679.784m
```

2.1 Direkte Berechnung der geographischen Breite bei gegebener Meridianbogenlänge aus der Differentialgleichung $dgB = 1/M \, dG$ durch numerische Integration nach Runge-Kutta

Zur nichtiterativen Berechnung der geographischen Breite aus der Meridianbogenlänge sind analytische Rechenformeln zum Beispiel von Helmert (Helmert, 1880) oder König-Weise (König-Weise, 1951) durch Inversion der trigonometrischen Reihe abgeleitet worden.

Die Umsetzung dieser Entwicklungen in einen symbolischen Automatismus ist zwar möglich (Krack, 1982), aber sehr aufwendig. Viel einfacher und übersichtlicher läßt sich das vorliegende Problem mithilfe numerischer Verfahren lösen.

Zu integrieren ist die Differentialgleichung 1.Ordnung $dgB = 1/M \, dG$ in Bezug auf die unabhängige Variable G. Dazu bietet sich zum Beispiel eine Runge-Kutta Methode, wie sie in (Maeder, 1991 S.172) beschrieben ist, an. Der nachstehende, aus (Maeder, 1991 S.259) entnommene Algorithmus 2.Ordnung *RunKut* ist dafür konzipiert, ein Differentialgleichungssystem 1.Ordnung in einer unabhängigen Variablen zu lösen.

In[1]:=

```
BeginPackage["RunKut`"]
RunKut::"usage" =
  "RunKut[{e1,e2,...}, {y1,y2,...}, {a1,a2,...}, {t1, dt}]
  numerically integrates the ei as
  functions of the yi with initial values ai.
  The integration proceeds in steps of dt from 0 to t1.
  RunKut[{e1,e2,...}, {y1,
    y2,...}, {a1,a2,...}, {t, t0, t1, dt}] integrates
  a time-dependent system from t0 to t1."
Begin["`Private`"]
RKStep[f_, y_, y0_, dt_] :=
  Module[{k1, k2, k3, k4},
    k1 = dt N[f /. Thread[y -> y0]];
    k2 = dt N[f /. Thread[y -> y0 +  $\frac{k1}{2}$ ]];
    k3 = dt N[f /. Thread[y -> y0 +  $\frac{k2}{2}$ ]];
    k4 = dt N[f /. Thread[y -> y0 + k3]];
    y0 +  $\frac{1}{6}$  (k1 + 2 k2 + 2 k3 + k4)]
RunKut[f_List, y_List, y0_List, {t1_, dt_}] :=
  NestList[RKStep[f, y, #, N[dt]] &, N[y0], Round[N[ $\frac{t1}{dt}$ ]]] /;
    Length[f] == Length[y] == Length[y0]
RunKut[f_List, y_List, y0_List, {t_, t0_, t1_, dt_}] :=
  Module[{res}, res = RunKut[Append[f, 1],
    Append[y, t], Append[y0, t0], {t1 - t0, dt}];
    (Drop[#, -1] &) /@ res] /; Length[f] == Length[y] == Length[y0]
End[];
Protect[RunKut];
EndPackage[];
```

Out[1]= RunKut`

Out[2]= RunKut[{e1,e2,...}, {y1,y2,...}, {a1,a2,...}, {t1, dt}] numerically integrates the ei as functions of the yi with initial values ai. The integration proceeds in steps of dt from 0 to t1. RunKut[{e1,e2,...}, {y1,y2,...}, {a1,a2,...}, {t, t0, t1, dt}] integrates a time-dependent system from t0 to t1.

Out[3]= RunKut`Private`


```

In[8]:=  ax = N[6377397.155, 12]; alpha = N[ $\frac{1}{299.152802584}$ , 12];

bx = N[ax - ax alpha, 12]; cx = N[ $\frac{ax \ ax}{bx}$ , 12];

e2 = N[ $\frac{ax \ ax - bx \ bx}{ax \ ax}$ , 12]; e'2 = N[ $\frac{ax \ ax - bx \ bx}{bx \ bx}$ , 12];

e' = N[ $\sqrt{e'2}$ , 12]; rhod = N[ $\frac{180}{\pi}$ , 12];

form = If[-10 < #1 < 10, Null, #1] &;

```

1.Schritt:

Gleichung zur Berechnung des Meridiankrümmungshalbmessers in der geographischen Breite gB:

```

In[9]:=  Clear[m, gB];

m =  $\frac{cx}{\left(\sqrt{1 + e'^2 \cos[gB]^2}\right)^3}$ ;

```

Damit lautet der Differentialquotient $\frac{dgB}{dG}$:

```

In[10]:=  dgBndG =  $\frac{1}{m}$ ;

```

2.Schritt:

Die Meridianbogenlänge wird am Äquator mit gB=0 beginnend gezählt. Der Startwert für die RungeKutta Methode ist damit gB0=0. Die bei der Runge-Kutta Methode zu erwartende numerische Unschärfe ist von der Schrittweite dG abhängig, welche die gegebene Bogenlänge unterteilt. Zur sicheren Anwendung des Verfahrens kann, bis praktische Erfahrungen zu dieser speziellen Anwendung vorliegen, die Schrittweite n sukzessive erhöht werden, bis die gewünschte Rechenschärfe erreicht ist.

```

In[11]:=  gB0 = 0;
n = 2;

```

3.Schritt:

Numerische Vorgaben für ein Rechenbeispiel auf dem Besselellipsoid mit der Meridianbogenlänge gG = 6 009 883.942m:

```

In[12]:=  gG = N[6009883.942, 12];
dG = N[ $\frac{gG}{n}$ , 12];

```

4.Schritt:

Aufruf der Prozedur *RunKut* mit den vorbesetzten Parametern:

```
In[13]:= erg = RunKut[{dgBndG}, {gB}, {gB0}, {gG, dG}];
```

5.Schritt:

Ausgabe der Vorgaben und Ergebnisse

```
In[14]:= Print["Integr.Schrittweite dG:",  
  PaddedForm[dG, {13, 3}, ExponentFunction->form], "m"];  
Print["Geographische Breite gB= ", N[erg[[n+1]] rhod, 12], "°"];
```

Integr.Schrittweite dG: 3004941.971m

Geographische Breite gB= {54.2209513999}°

6.Schritt:

Verkleinern der Schrittweite bis die Genauigkeitsschranke 1×10^{-8} (entsprechend 1mm) für $n=32$ erreicht wird:

```
In[15]:= n = 32;  
dG = N[ $\frac{gG}{n}$ , 12];  
erg = RunKut[{dgBndG}, {gB}, {gB0}, {gG, dG}];  
Print["G = ",  
  PaddedForm[gG, {13, 3}, ExponentFunction->form], "m"];  
Print["Integr.Schrittweite dG:",  
  PaddedForm[dG, {13, 3}, ExponentFunction->form], "m"];  
Print["Geographische Breite gB= ", N[erg[[n+1]] rhod, 12], "°"];
```

G = 6009883.942m

Integr.Schrittweite dG: 187808.873m

Geographische Breite gB= {54.2209136374}°

2.2 Direkte Berechnung der geographischen Breite bei gegebener Meridianbogenlänge als Sonderfall der Ersten geodätischen Hauptaufgabe durch numerische Integration nach Runge-Kutta

Die Berechnung der geographischen Breite aus der Meridianbogenlänge kann auch als Sonderfall einer Anfangswertaufgabe im geographischen Koordinatensystem (Erste geodätische Hauptaufgabe) gesehen werden. Als Lösungsalgorithmen zur Ersten geodätischen Hauptaufgabe stehen die bekannten Algorithmen, nach Boltz, Schödlbauer oder Bessel/Helmert zur Verfügung. Sie sind in (Schödlbauer, 1981) ausführlich beschrieben. Hierbei muß lediglich beachtet werden, daß entsprechend der Länge des Meridianbogens, die Rechenverfahren für kurze, mittlere oder lange Entfernung benutzt werden.

Von den genannten Verfahren eignen sich die auf den Legendreschen Reihen basierenden Algorithmen (insbesondere das Boltzsche Verfahren) ganz besonders für die formale Entwicklungen mit *Mathematica* (Krack, 1980). Zur Ableitung entsprechend weitreichender Rechengleichungen, mit denen die geographische Breite vom Äquator bis zum Pol ($G=10000\text{km}$) übertragen werden kann, sind allerdings rechenzeitintensive Programmläufe notwendig.

Eine wesentlich einfachere und vor allem allgemeingültigere Lösung erhält man, wenn man die Differentialquotienten der geodätischen Linie auf der Rechenfläche in Abhängigkeit der Gaußschen Fundamentalgrößen 1.Ordnung entwickelt und das entstehende Differentialgleichungssystem 1.Ordnung mit der Meridianbogenlänge als unabhängige Variable nach Runge Kutta numerisch integriert. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, daß die Entwicklung, wenn wie im folgenden die Flächendarstellung in Gaußschen Flächenparametern erfolgt, sofort auch auf andere Flächen übertragen werden kann.

1.Schritt:

Darstellung eines Ellipsoids mit den Halbachsen a_x , b_x und c_x in Parameterform mit den Parameterlinien u und v , die hier speziell für die reduzierte Breite und eine analog definierte reduzierte Länge stehen. Die 3D-Koordinaten (x_1 , x_2 , x_3) eines Punktes auf der Oberfläche des Ellipsoids lauten dann wie folgt:

```
In[8]:= Clear[ax, bx, cx];
        x1 = ax Cos[u] Cos[v];
        x2 = bx Cos[u] Sin[v];
        x3 = cx Sin[u];
```

2.Schritt:

Die Metrik der Fläche wird mit den Gaußschen Fundamentalgrößen 1.Ordnung g_E , g_F und g_G beschrieben. Sie werden aus obiger Darstellung mithilfe der Mathematica Funktion ∂_u und ∂_v zur symbolischen Bildung von partiellen Differentialquotienten entwickelt.

```
In[9]:= gE = (∂u x1)² + (∂u x2)² + (∂u x3)²;
        gF = ∂u x1 ∂v x1 + ∂u x2 ∂v x2 + ∂u x3 ∂v x3;
        gG = (∂v x1)² + (∂v x2)² + (∂v x3)²;
```

3.Schritt:

Beim Fortschreiten auf einer beliebigen Oberflächenkurve unter dem Azimut g_A um den Betrag ds ergeben sich mit g_E , g_F und g_G die differentiellen Änderungen $dvnds$ und $dunds$ auf den Parameterlinien u und v :

$$\begin{aligned} \text{In}[12] := \quad dvnds &= \sqrt{\frac{g_E}{g_E g_G - g_F^2}} \sin[g_A]; \\ dunds &= \frac{\cos[g_A]}{\sqrt{g_E}} - \frac{g_F dvnds}{g_E}; \end{aligned}$$

4.Schritt:

Die Oberflächenkurve soll nun als geodätische Linie spezifiziert werden. Dies wird durch die Bedingung dA_{nds} erzwungen. (Heck, 1987).

$$\text{In}[14] := \quad dA_{nds} = \frac{\left(\frac{g_F \partial_u g_E}{g_E} + \partial_v g_E - 2 \partial_u g_F \right) dunds + \left(\frac{g_F \partial_v g_E}{g_E} - \partial_u g_G \right) dvnds}{2 \sqrt{g_E g_G - g_F^2}};$$

Damit liegt eine Lösung der 1.geodätische Hauptaufgabe auf einer Fläche in Gaußscher Parameterdarstellung in Form eines Differentialgleichungssystems 1.Ordnung in Abhängigkeit der Länge der geodätischen Linie vor. Die Aufgabe "Berechnung der Breite aus der Meridianbogenlänge" wird nun als Sonderfall mit folgenden Startwerten betrachtet:

Gegeben: Ausgangspunkt 1 auf dem Äquator mit den Parameterwerten $u_1=0, v_1=0$

Azimut der Geodätischen Linie $g_A=0$

Länge der Geodätischen Linie g_S = Meridianbogenlänge

Gesucht: Parameterwert u_2 des Endpunktes 2 der geodätischen Linie

5.Schritt:

Zahlenvorgaben für ein Rechenbeispiel auf dem Rotationsellipsoid nach Bessel:

```
In[15] :=  ax = N[6377397.155, 12];
           bx = N[6377397.155, 12];
           cx = N[6356078.962, 12];
           rhod = N[180 / Pi, 12];
```

Startwerte im Ausgangspunkt 1 für die geodätischen Linie. Meridianbogenlänge $g_S = 6009883.942\text{m}$.

```
In[16] :=  u1 = N[0.0, 12];
           v1 = N[0.0, 12];
           gA0 = N[0.0, 12];
           gS = N[6009883.942, 12];
```

6.Schritt:

Aufruf der Prozedur **RunKut** mit den vorbesetzten Parametern und numerische Integration des kompletten Differentialgleichungssystems nach der unabhängigen Variablen g_S mit der Schrittweite ds . Die Schrittweite ds wird entsprechend der Erfahrung in Abschnitt 2.1 gewählt.


```

In[17]:=  n = 32;
          ds = N[ $\frac{gS}{n}$ , 12];

In[18]:=  erg = RunKut[{dvnds, dunds, dAnds},
                      {v, u, gA}, {v1, u1, gA0}, {gS, ds}];

In[19]:=  v2 = N[erg[[n + 1, 1]], 12];
          u2 = N[erg[[n + 1, 2]], 12];

```

Ergebnisse:

```

In[20]:=  Print["v2 = ", N[v2 rhod, 12], "°"];
          Print["u2 = ", N[u2 rhod, 12], "°"];
          Print["gA2 = ", N[erg[[n + 1, 3]], 12], "°"];

v2 = 0.°
u2 = 54.1298679001°
gA2 = 0.°

```

7.Schritt:

Der Paramter u2 entspricht auf Rotationsellipsoid der reduzierten Breite. Er wird wie folgt in die geographische Breite transformiert:

```

In[21]:=  gB = N[ArcTan[ $\frac{ax \tan[u2]}{cx}$ ] rhod, 12];
          Print["geographische Breite gB = ", gB, "°"];

geographische Breite gB = 54.220913638°

```

Literaturverzeichnis

Aringer, K.: Geodätische Hauptaufgaben auf Flächen in kartesischen Koordinaten
Heft 421, Reihe C, DGK, München 1994

Großmann, W.: Geodätische Rechnungen und Abbildungen in der Landesvermessung
Verlag Konrad Witwer, Stuttgart 1976

Hearn, A.C.: Reduce - a User oriented Interactive System for Algebraic Simplification
Interactive Systems for Experimental Applied Mathematics, Academic Press, New York 1986

Heck, B.: Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung
S.228-232, Herbert Wichmann, Karlsruhe, 1987

Heitz, S.: Koordinaten auf geodätischen Bezugsflächen
S.125-128, Dümmler, Bonn 1985

Helmert, F.R.: Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie
S.53-55, Band 1, G.Teubner, Leipzig 1880

Kofler, M.: Maple V, Release 2, Addison Wesley, Bonn 1994

Köhnlein, W.: Untersuchung über große geodätische Dreiecke auf geschlossenen Rotationsflächen unter besonderer Berücksichtigung des Rotationsellipsoides. S.2-9, Heft 51 Reihe C, DGK München, 1962

König, R. Weise K.H.: Mathematische Grundlagen der höheren Geodäsie und Kartographie.
S. 49ff, Band 1, Springer, Berlin 1951

Krack, K.: Rechnerunterstützte Ableitung der Legendreschen Reihen.
ÖZfV 68, 4/1980, S.145 - 156

Krack, K.: Zur direkten Berechnung der geographischen Breite aus der Meridianbogenlänge auf Rotationellipsoiden. S.122ff, AVN 3, 1982

Maeder, R.: Programming in Mathematica
Addison Wesley, Bonn 1991

Mittermayer, E.: Formeln zur Berechnung der ellipsoidischen geographischen Endbreite für Meridianbögen beliebiger Länge. S403-408, ZfV 11, 1965

Schödlbauer, A.: Rechenformeln und Rechenbeispiele zur Landesvermessung, Teil 1.
Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe 1981

Wolfram, S.: Mathematica
Addison Wesley, Bonn 1994

AUFBAU EINES MESS-BUSSES ZUR DATENERFASSUNG FÜR KINEMATISCHE VERMESSUNG

Dipl.-Phys. Leopold-Th. Bielawski

Institut für Geodäsie
Universität der Bundeswehr München
85577 Neubiberg

Zusammenfassung

Das KiSS (Kinematic Survey System) ist ein System für die kinematische 3D-Aufnahme und Erfassung der Möblierung von Straßen und Transportwegen. Das System ist auf einem Kleinbus aufmontiert und besteht aus Sensoren zur Bestimmung der Fahrzeugtrajektorie (Inertiales Navigationssystem (INS), Global Positioning System (GPS), Weg-/Geschwindigkeitssensor, Barometer), sowie CCD-Kameras zur photogrammetrischen Erfassung der Umweltobjekte vor dem Fahrzeug (Videokamera und Grauwert-CCD-Kamerapaar auf einer festen Basis). Die offene Architektur des PC's, sowie die auf dem Markt in einer großen Auswahl vorhandenen Datenerfassungskarten, verschiedene Schnittstellenadapter, Signalkonditionierungs-Hardware und fertige Softwaremodule erlauben dem Systemdesigner in kurzer Zeit ein leistungsfähiges System für diese Meßaufgaben zusammenzustellen..

1 Einleitung

Der Anstieg des Verkehrsaufkommens und das Verlangen nach Sicherheit im Straßenverkehr führt dazu, daß die Nachfrage nach aktuellen, 3-dimensionalen Straßendaten rapide wächst. Auch die ständige Aktualisierung und das Konsistenthalten des vorhandenen Datenbestandes ist bei den klassischen Vermessungsmethoden mit sehr hohen Kosten und sehr großen Anstrengungen verbunden.

Die Arbeitsgruppe IKV (Integrierte Kinematische Vermessung) des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München hat ein modulares Multisensor-Meßsystem für die 3D-Vermessung von Straßen und Transportwegen entwickelt. Das System ist auf einem Fahrzeug montiert und erfaßt sowohl die Trajektorie des Fahrzeuges, als auch die Straßenobjekte entlang der befahrenen Strecke. Die so gewonnenen Daten (Videobildmaterial, digitale Bildpaarfolgen und Trajektoriedaten) können der Weiterverarbeitung (Postprocessing) zugeführt, und in einer Datenbank abgelegt werden.

2 Systembeschreibung

Das System ist als ein mobiles Datenerfassungssystem konzipiert, dessen Aufgabe darin besteht, die verkehrsrelevanten Daten entlang der befahrenen Strecke aufzunehmen und zu speichern. Während der Meßfahrt findet keine Echtzeit-Datenverarbeitung statt; es werden lediglich aufgenommene Daten auf Plausibilität überwacht und dargestellt. Die detaillierte Vorstellung des Konzeptes und der möglichen Anwendungen ist in [1] und [2] zu finden. Das System ist modular aufgebaut und sehr flexibel in bezug auf die Integration von zusätzlichen Sensoren. Es besteht grundsätzlich aus folgenden Funktionseinheiten (Abb. 1):



- Abb.1. Fahrzeug und mechanischer Aufbau
- Rechner und Schnittstellen
- Sensoren

- Stromversorgung

2.1 Fahrzeug und mechanischer Aufbau

Das Meßsystem KiSS ist auf bzw. in einem Fahrzeug aufgebaut, das mit einer Klimaanlage ausgestattet ist, so daß eine aktive Rechner-Schrankklimatisierung nicht notwendig ist.

Die Rechner, das LCD-Display und die USV werden in einem 19 Zoll Schrank von 1200 mm Höhe untergebracht. Zur besseren Durchlüftung ist der Schrank an der Schrankfront und Schrankrückseite offen. Da im Fahrzeug mit Vibrationen gerechnet werden muß, wird der Schrank auf 6 elastischen Gummipuffern auf dem Fahrzeugboden befestigt.

Die beiden digitalen CCD-Kameras werden auf dem Dach des Fahrzeuges an einem stabilen Rahmen mit einer festen Basis befestigt. Damit wird gewährleistet, daß sich die relative Lage der Kameras zueinander nicht verändert. Auf dem gleichen Rahmen, in der Mitte zwischen den beiden Kameras, ist die GPS - Antenne positioniert. Eine Farbvideokamera wird im Inneren des Fahrzeuges montiert. Um die Stromversorgung zu gewährleisten, wird das Fahrzeug mit einer speziellen hochwertigen Lichtmaschine (Wirkungsgrad höher als 90%), ausgestattet.

2.2 Rechner und Bussystem

Der Rechner, ein Industrie PC, ist auf Basis eines Dualprozessor Mainbord von ASUS, bestückt mit zwei Intel- Pentium Prozessoren aufgebaut. Der Hauptspeicher ist mit 128 MB Kapazität in Form von zwei High Density Speichermodulen mit automatischer Fehlererkennung und Fehlerkorrektur ausgestattet. Eine PCI 64 Bit S3 V64 Graphikbeschleunigerkarte mit 2 MB Videoram ist für die graphische Oberfläche zuständig. Als Massenspeicher werden zwei 9 GB ULTRA SCSI Wechselplatten verwendet. Eine davon dient ausschließlich als Datenspeicher. Diese Wechselplatten werden nach der Meßfahrt in einen Auswerterechner eingeschoben. Auf diese Weise ist der Datenaustausch zwischen Meß- und Auswerterechner, der sich im Büro befindet, realisiert. Im Auswerterechner werden diese Daten weiterbearbeitet und auf ein DAT-Band als Austauschmedium übertragen. Als Betriebssystem wird Windows NT eingesetzt.

Das Meßrechnersystem ist so konzipiert, daß der Anschluß verschiedener Sensoren mit unterschiedlichen Schnittstellen möglich ist. Es besteht aus folgenden Komponenten:

- PCI-Multikanal-Framegrabber

Der Framegrabber dient zum Empfang und zur Decodierung digitaler Videosignale. In unserem Fall wird der MVFG Inspecta 2 Framegrabber von der Firma Mikrotron eingesetzt.

Die Datenrate für den Bilddatentransfer auf dem PCI-Bus erreicht über 100 MB/sec und kann alle möglichen Videoquellen in Echtzeit verarbeiten.

Während ein Bild eingespeichert wird, muß die CPU nicht darauf warten, sondern kann mit dem vorhergehenden Bild arbeiten. Die CPU hat jederzeit uneingeschränkten, wahlfreien Zugriff auf die Bilddaten in einem der Speicherbereiche. Gleichzeitig steht der andere Speicherbereich zum Ablegen neuer Bilddaten mit einer Geschwindigkeit von 100 MB/sec bereit.

Spezielle Funktionen der Kameras werden mit vier Steuerleitungen bedient. Eine Steuerleitung kann z.B. den asynchronen Shutter-Eingang steuern.

- Intelligente (mit eigenem Prozessor und Peripherie ausgestattete) Datenerfassungskarte.

Die Modular-4/486 Datenerfassungskarte von Sorcus Computer ist für den PC / ISA -Bus konstruiert. Sie enthält einen kompletten Computer auf einer PC-Erweiterungskarte. Die Karte kann unabhängig vom PC arbeiten, so daß echte Parallelverarbeitung möglich ist. Maximal können bis zu 8 Erweiterungskarten in einem PC installiert werden. Die Basiskarte ist bereits mit umfangreicher Peripherie ausgestattet. Außer einem EPROM und einem statischen CMOS-RAM (z.Z. 4 MB oder 1MB oder 256 KB), das durch eine externe Batterie gepuffert werden kann, verfügt die Karte auch über einen Watch-Dog Timer und eine eigene Spannungsüberwachung. So können bei Ausfall der Stromversorgung wichtige Daten rechtzeitig gesichert werden. Durch die 4 (bzw. mit Modulextender 9) aufsteckbaren Module kann die Karte an beliebige Meß-, Steuer- und Kommunika-

tionsaufgaben angepaßt werden. Es sind Module sowohl für die Zuschaltung von unterschiedlichen Datenquellen (Analog- Digital-, Zählereingänge), als auch Schnittstellen möglich. In dem EPROM befindet sich ein Echtzeit-Multitasking-Betriebssystem für bis zu 1024 Tasks. Auch besteht die Möglichkeit, sich eigene Echtzeitprogramme für die Karte zu schreiben.

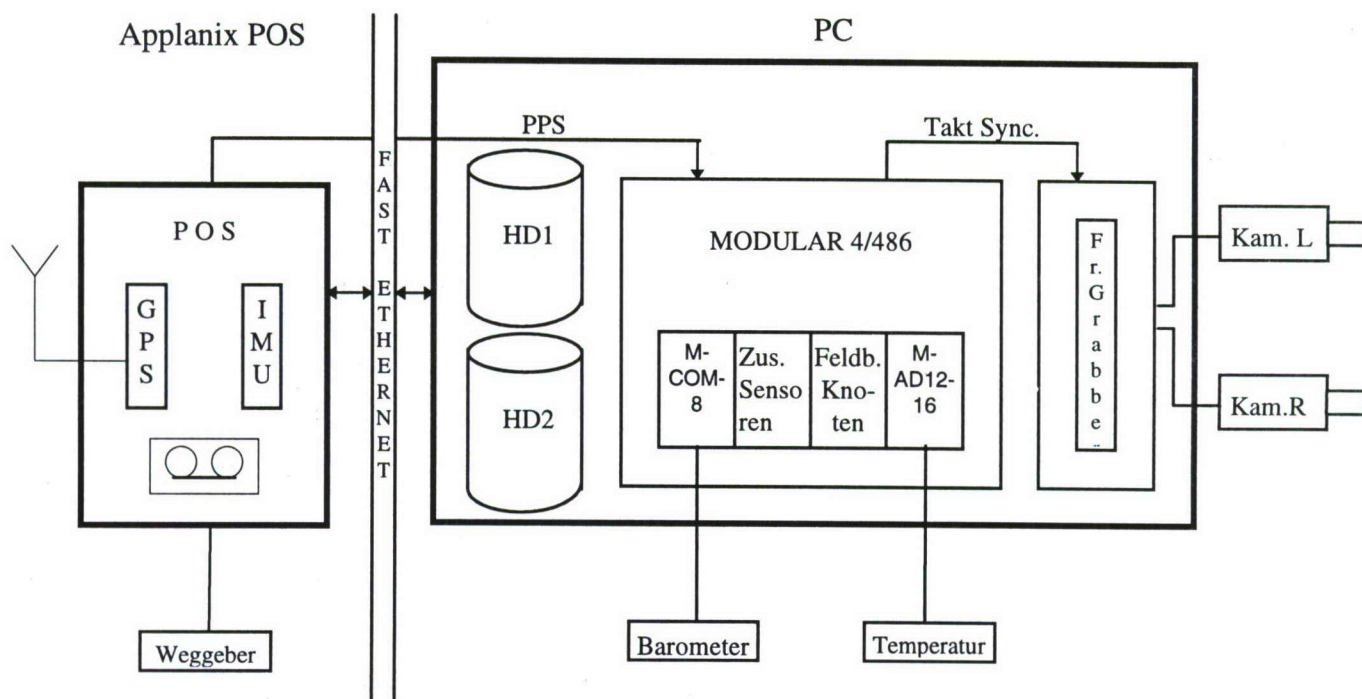


Abb. 2. Rechnerkonfiguration mit Applanix POS - System

Wie in den Abbildungen 2 und 3 ersichtlich, ist es möglich, verschiedene Konfigurationen nur durch den Einsatz unterschiedlicher Aufsteckmodule und eine entsprechende Softwarekonfiguration zu realisieren. Da es bereits Module für diverse Standard-Feldbussysteme gibt (CAN, Profibus, GPIB u.a.m.), ist es ohne großen Aufwand möglich, Sensoren mit entsprechender Busankoppelung anzuwenden.

Die Zeitsynchronisation erfolgt durch das 1PPS Signal des GPS-Empfängers. Dieser Puls wird auf der Karte weiter unterteilt und dient als Triggersignal für den Framegrabber. Dadurch kann die Bildaufnahme Frequenz mit der Fahrzeuggeschwindigkeit gekoppelt werden.

2.3 Sensoren und Schnittstellen

Die hohe Leistungsfähigkeit eines solchen Systems kann nur durch ein modulares Multisensorsystem erreicht werden. Da die meisten der gegenwärtig verwendeten Sensoren ihre Daten seriell übergeben, wurde in diesem Fall zunächst an keinen Feldbus gedacht. Allerdings ist es durch die Verwendung von Aufsteckmodulen der Datenerfassungskarte möglich, auch Sensoren mit einer Feldbusschnittstelle (z.B. GPIB, CAN usw.) anzuschließen.

2.3.1 Sensoren zur Trajektoriebestimmung

Für die genaue Bestimmung der Fahrzeugtrajektorie im 3D-Raum wird das Navigationssystem von Applanix 'POS/LV' eingesetzt. Das System besteht aus einem VME-Rechner, einer Inertialeinheit (IMU), und einem GPS-Empfänger. Es kann sowohl in Echtzeit- als auch im Post-Processed-Mode betrieben werden. Die Sensordaten (auch Rohdaten) werden auf ein 8mm Band (Exabyte 8200) aufgezeichnet. Der POS/LV - Rechner wird über eine Fast-Ethernet Interface mit dem Hauptrechner verbunden. Auf dem PC läuft unter Windows NT ein Kommunikationsprogramm, das für den Datenaustausch zuständig ist. (s. Abb. 2)

Für eine Genauigkeitssteigerung in der Positions- und Lagewinkelbestimmung ist auch der Einsatz eines INS mit hochgenauen Laserkreisel (IMAR INS) sowie zusätzlichen Stütz-Sensoren vorgesehen. (s. Abb.3)

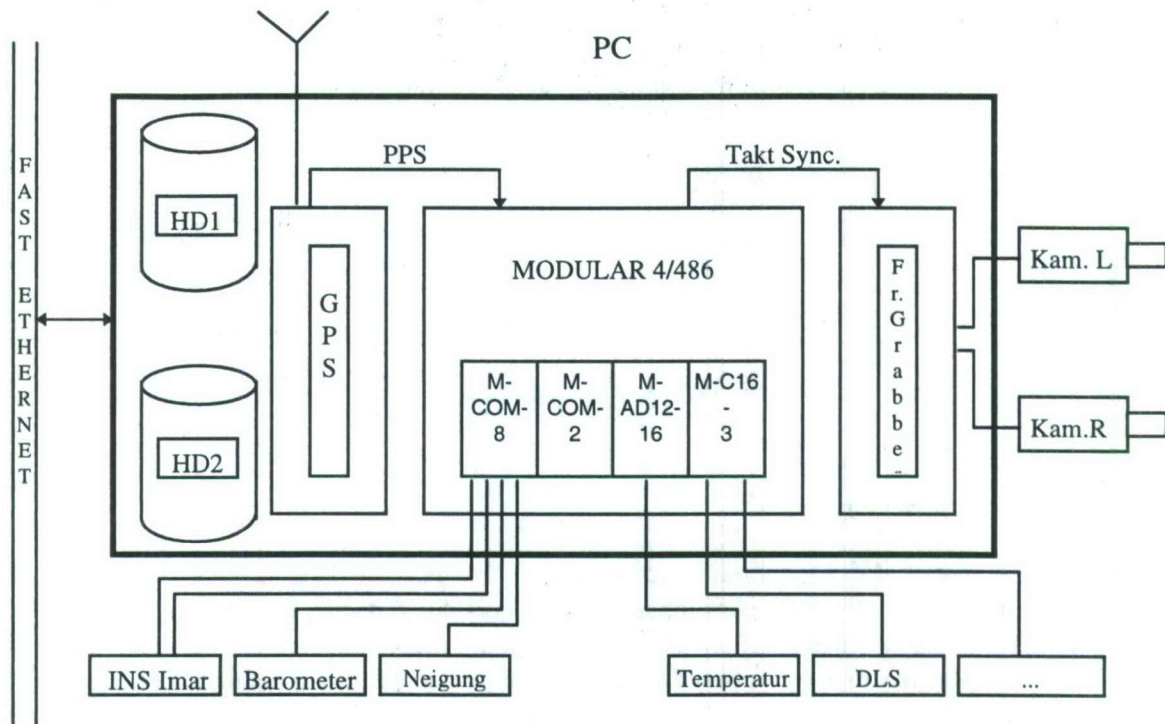


Abb. 3. Rechnerkonfiguration mit IMAR INS

2.3.2 Sensoren zur Objekterfassung

Die Farbvideokamera Sony VX 1E ist im Fahrzeuginneren eingebaut, und so ausgerichtet, daß sie ungefähr den gleichen Vorausschaubereich erfaßt wie die CCD-Kameras auf dem Fahrzeugdach. Die Kamera protokolliert die Meßfahrt auf Farbvideobänder. Das Videomaterial kann als Dokumentation der vorhandener Infrastruktur verwendet werden. Zusätzlich kann der gesprochene Kommentar des Fahrers aufgezeichnet werden.

Auf dem Dach des Fahrzeugs sind 2 digitale Grauwertkameras (Pulnix TM 9701) mit fester Basis auf einem stabilem Ständer montiert. Sie decken einen Vorausschaubereich von ca. 40m vor dem Fahrzeug, 20 - 30 m rechts von der Fahrbahn und ca. 12 m in der Höhe ab. Um eine genaue photogrammetrische Auswertung zu gewährleisten, werden vergütete Speziallinsen (Schneider, Bad Kreuznach Cinegon 1.4/12mm) mit geringen optischen Verzerrungen verwendet. Die Kameras liefern 8 Bit Vollbilder mit einer Auflösung von 768 x 484 Pixel. Um während der Fahrt die Kameras auf die sich ändernden Lichtverhältnisse einzustellen (Shutterzeit der Kameras läßt sich von 1/60 bis 1/16000 s einstellen), wird kurz vor der Bildaufnahme eine Voraufnahme ausgelöst. Sie dienen zur Berechnung eines mittleren Grauwertes, aus dem dann die aktuelle Shutterzeit berechnet und eingestellt wird.

2.4 Stromversorgung

Es wird generell eine 220V, 50 Hz Stromversorgung zur Verfügung gestellt. Hierzu wird eine unterbrechungsfreie 220V Stromversorgung (USV) von dem 24V Bordnetz mit Energie versorgt. Die USV ist ein echter Sinuswandler d.h. die angeschlossenen Verbraucher werden dauernd über den Inverter mit einer in Frequenz und Phase auf 220V, 50Hz geregelten Sinusspannung versorgt. Liegt die Bordnetzspannung im Bereich 18-36 V an, so werden die Akkus mit dieser Energie nachgeladen. Diese USV besteht aus zwei 19" Einschüben, von denen der eine die Elektronik mit dem Inverter, der zweite

die wartungsfreien Blei- Gel Akkus erhält. Die Kapazität der Akkus ist so dimensioniert, daß die USV-Anlage bei Vollast (1000W) die angeschlossenen Verbraucher ca. 30 Minuten mit 220V versorgen kann, wenn keine 24V Eingangsspannung anliegt. Darüber hinaus erzeugt die USV Anlage einen potentialfreien Powerfailausgang, der dazu genutzt wird, die Anlage definiert herunterzufahren, wenn die Primärspannung ausfällt und die Akkukapazität zu Neige geht. Durch das definierte Herunterfahren von Windows NT wird sichergestellt, daß keine Daten verloren gehen.

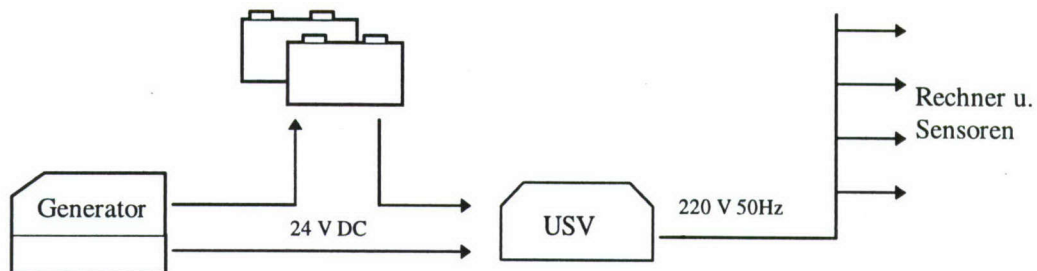


Abb. 4. Schema: Stromversorgung

Da alle konventionellen Kfz-Drehstromlichtmaschinen den entscheidenden Nachteil eines relativ niedrigen Wirkungsgrades (bei Betriebstemperatur ca. 30 bis 40%) haben, erzeugen sie enorme Wärmemengen und sind für den Dauerbetrieb mit hoher Leistung nicht geeignet. Für das Laden von modernen Blei-Gel Batterien mußte die Standard-Lichtmaschine gegen eine geeignete (z.B. AGT-PTO von Fischer-Panda, Wirkungsgrad ca. 95%) ausgetauscht werden. Mit dieser AGT- Lichtmaschine kann, solange der Motor läuft, mit Hilfe eines AGT- Controllers eine Dauerstromversorgung bis ca. 2.5 kW gewährleistet werden.

3 Zusammenfassung

Das vorgestellte Meßfahrzeug erlaubt es, kostengünstig und mit vertretbarem Zeitaufwand die sehr umfangreichen geometrischen und semantischen Daten an der befahrenen Strecke zu erfassen und zu speichern. Diese Daten werden nach der Meßfahrt dem Auswerterechner zur Weiterverarbeitung (Postprozessing), bzw. zur Archivierung auf DAT-Bändern zur Verfügung gestellt. Die Testfahrten auf einer ca. 30 km Teststrecke und erste Pilotfahrten haben die in dieses System gesetzte Erwartungen bezüglich der Zuverlässigkeit und Genauigkeit voll bestätigt. Auf Grund des modularen Aufbaus ist das Meßsystem mit geringem Aufwand um zusätzliche Sensoren erweiterbar und für neue Meßaufgaben konfigurierbar, dies kann z.B. die Erfassung und Dokumentation des Zustandes von Straßenoberflächen sein.

4. Literatur

- [1] HEISTER H., CASPARY W., HOCK CHR., KLEMM J., STERNBERG H.: *KiSS a Hybride Measuring System for Kinematic Surveying*, Stuttgart, 3rd Int. Workshop on High Precision Navigation, Stuttgart, April 1995
- [2] CASPARY W., HEISTER H., HOCK CHR., KLEMM J., STERNBERG H.: *A Kinematic Survey System for Transportation Infrastructure*, Capetown, South Africa, February 1995.

EINSATZ DES KALMAN-FILTERS ZUR KINEMATISCHEN POSITIONIERUNG EINES LANDFAHRZEUGES AUS GPS-DATEN

Dr.-Ing. Chen Guoping
Dipl.-Ing. Harald Sternberg

Institut für Geodäsie
Universität der Bundeswehr München
85577 Neubiberg

Zusammenfassung

Am Institut für Geodäsie an der Universität der Bundeswehr München wird ein kinematisches Meßsystem zur Koordinierung von fahnbahnnahen Objekten entwickelt. Dazu werden zwei Datenerfassungsbereiche miteinander kombiniert: die Trajektorienerfassung zur Bestimmung von Position, Geschwindigkeit und Lage des Landfahrzeuges im Raum und die Objekterfassung mit Hilfe zweier CCD-Kameras zur Einmessung der Objekte im Bild. Zur Trajektorienbestimmung werden hauptsächlich zwei Komponenten eingesetzt: ein inertiales Navigationssystem (INS) und das Global Positioning System (GPS). Die von den einzelnen Teileinheiten gelieferten Daten werden zunächst getrennt und autonom behandelt. Die dabei gewonnenen Ergebnisse werden anschließend als Eingangsdaten eines gemeinsamen Auswertesystems benutzt und zusammen verarbeitet.

Das Subsystem GPS (zwei 'GPS-Card 951R' von der Firma NovAtel) ist als differentielles Postprocessing-GPS konzipiert: der Referenzempfänger steht auf einem Punkt, dessen Koordinaten bekannt sind, während der zweite Empfänger auf einem Landfahrzeug montiert ist. Die Beobachtungen werden in der Örtlichkeit aufgezeichnet und auf einen Rechner übertragen. Aus den dabei erhaltenen Daten werden die Position und die Geschwindigkeit des Fahrzeuges in einer späteren Berechnungsphase bestimmt.

Im vorliegenden Beitrag wird das Kalman-Filter des GPS-Subsystems zur Bestimmung der Position und der Geschwindigkeit des Landfahrzeuges vorgestellt. Das Kalman-Filter stützt sich hauptsächlich auf die Pseudoentfernungsbeobachtungen. Die genaueren Phasenbeobachtungen kommen hierbei als Hilfsgrößen zum Einsatz und dienen vorwiegend der Bestimmung der Geschwindigkeit des Fahrzeuges. Zahlreiche Testfahrten zeigten, daß das Kalman-Filter zur Auswertung der GPS Daten eines kinematischen Systems geeignet ist.

1 Einleitung

Zur kinematischen Positionierung eines Landfahrzeuges, das mit GPS und INS ausgerüstet ist, spielt das Subsystem GPS eine entscheidende Rolle. Die absolute Positionierung des Fahrzeuges stützt sich hauptsächlich auf GPS Daten, da das Subsystem INS nur eine relative Positionierung liefert. Als Beobachtungsgrößen bietet GPS Pseudoentfernungen und Trägerphasen. Um mit diesen beiden Beobachtungsarten die Fahrzeugposition zu bestimmen, sind in den letzten Jahren eine Vielzahl von Auswertungsverfahren vorgeschlagen worden. In KLEUSBERG (1986) wurde ein sequentielles Ausgleichungsverfahren vorgestellt, in dem die Fahrzeugposition epochenweise mit den Pseudoentfernungen und den aus Trägerphasen abgeleiteten Dopplermessungen bestimmt wurde. Mit diesem Verfahren ist eine Positionierungsgenauigkeit von 0.5m zu erwarten. Voraussetzung ist jedoch, daß während der Fahrt kein Signalabriß auftritt. Eine andere Vorgehensweise besteht im wesentlichen aus zwei Schritten: der Glättung der Pseudoentfernungen mit Trägerphasen und der epochenweise Bestimmung der Fahrzeugposition mit den geglätteten Pseudoentfernungen. Dieses Verfahren wurde von HATCH (1982) abgeleitet und von vielen anderen Autoren erweitert. Eine ausführliche Beschreibung ist in LACHAPPELLE, FALKENBERG und CASEY (1987, S.257-274), TEUNISSEN (1991, S.115-125) und JIN (1996, S.15-57) zu finden. Bemerkenswert ist jedoch, daß die oben erwähnten beiden Verfahren lediglich die Fahrzeugposition liefern. Die Geschwindigkeit des Fahrzeuges wurde hierbei nicht geschätzt. Andere Verfahren versuchten demgegenüber, mit den GPS Daten die Fahrzeugposition und die -geschwindigkeit gleichzeitig zu schätzen. Zu diesem Zweck wurde in erster Linie das Kalman-Filter eingesetzt. In SCHWARZ, CANNON und WONG (1989, S.345-353) wurden verschiedenen Modellansätze untersucht. Die Beobachtungsgrößen sind hier die einfach differenzierten Pseudoentfernungen, Trägerphasen und Dopplermessungen. Der Zustandsvektor besteht aus den Parametern Fahrzeugposition, -geschwindigkeit und/oder -beschleunigung im geographischen System sowie Uhrfehlern und Phasenmehrdeutigkeit. Da kein direkter Zusammenhang zwischen dem Zustandsvektor und den Beobachtungsgrößen besteht, ist es erforderlich, ein kartesisches Koordinatensystem als Übergangssystem einzuführen, um die Beobachtungsgleichungen zu linearisieren.

In diesem Beitrag wird das Kalman-Filter mit differenziellem GPS zur kinematischen Positionierung eines Landfahrzeuges präsentiert. Im Kapitel 2 wird das Filter Modell vorgestellt, das im geozentrischen System abgeleitet wird. In Anbetracht der Tatsache, daß das GPS-Signal während der Fahrt häufig abreißt und die Wiederbestimmung der Phasenmehrdeutigkeit kaum möglich ist, werden außer den Pseudoentfernungen die aus Trägerphasen abgeleiteten Phasenraten als Beobachtungsgrößen genutzt. Diese werden doppeldifferenziert, um den Einfluß von Uhrfehlern und Atmosphäre zu verringern. Anschließend werden im Kapitel 3 zwei numerische Beispiele vorgestellt, die den zahlreichen Proberechnungen entstammen, die im Rahmen des Projektes KiSS am Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München durchgeführt wurden. Schließlich werden im Kapitel 4 die Schlußfolgerungen gezogen.

2 Modellbildung

Die Zustandsschätzung mit dem Kalman-Filter gewinnt in vielen Bereichen zunehmend an Bedeutung. Für eine ausführliche Beschreibung über dieses Verfahren wird auf SCHRICK (1977), CHUI und CHEN (1987) verwiesen. Im folgenden werden die für die Auswertung benötigten Modelle vorgestellt.

2.1 Zustandsmodell

Im allgemeinen läßt sich der dreidimensionale Bewegungszustand eines Fahrzeuges zum Zeitpunkt t_k mit dem diskreten kinematischen Modell

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} + \Delta t \dot{\mathbf{x}}_{k-1} + \frac{1}{2} \Delta t^2 \ddot{\mathbf{x}}_{k-1} + \frac{1}{6} \Delta t^3 \dddot{\mathbf{x}}_{k-1} + \dots$$

beschreiben, wobei $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ gilt und \mathbf{x} , $\dot{\mathbf{x}}$, $\ddot{\mathbf{x}}$... der Orts-, Geschwindigkeit-, Beschleunigungsvektor ... des Fahrzeuges sind und dafür $\mathbf{x} = (x \ y \ z)^T$ gilt. In der Praxis sind zwei unterschiedliche Zustände des Fahrzeuges zu betrachten: Stillstand und Bewegung. Diese zwei Zustände werden wie folgt modelliert:

$$\mathbf{x}_k = \begin{cases} \mathbf{x}_{k-1} + \Delta t \dot{\mathbf{x}}_{k-1} + \frac{1}{2} \Delta t^2 \ddot{\mathbf{x}}_{k-1} & \text{I: Stillstand} \\ \mathbf{x}_{k-1} + \Delta t \dot{\mathbf{x}}_{k-1} + \frac{1}{2} \Delta t^2 \ddot{\mathbf{x}}_{k-1} + \frac{1}{6} \Delta t^3 \ddot{\mathbf{x}}_{k-1} & \text{II: Bewegung} \end{cases}, \quad (2.1.1)$$

wobei $\ddot{\mathbf{x}}_{k-1}$ das Modellrauschen ist. Im (2.1.1)I wird der Stillstand des Fahrzeuges durch geradlinige Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit beschrieben. Die Beschleunigung des Fahrzeuges tritt als Modellrauschen im Modell auf. (2.1.1)II modelliert den Zustand des Fahrzeuges mit einem geradlinigen Bewegungsmodell mit konstanter Beschleunigung. Der Ruck wird als Modellrauschen betrachtet. Der Grund, den Stillstand des Fahrzeuges mit (2.1.1)I zu modellieren, liegt darin, daß sich die genaueren Phasenbeobachtungen durch die Einführung der Geschwindigkeit in den Zustandsvektor auf die Positionierung des Fahrzeuges günstig auswirken. Modell (2.1.1) ist zeitinvariant und besitzt folgende Matrizenform:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{T} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{B} \Omega_{k-1}. \quad (2.1.2)$$

Hier sind \mathbf{X}_k der Zustandsvektor, \mathbf{T} die Transitionsmatrix und \mathbf{B} die Koeffizientenmatrix des Modellrauschvektors Ω_{k-1} .

Für Modell (2.1.1)I gelten

$$\mathbf{X}_k = (x_k, y_k, z_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k)^T, \quad (2.1.3a)$$

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \Delta t^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \Delta t^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t \end{pmatrix}, \quad (2.1.3b)$$

$$\text{und } \Omega_{k-1} = (\ddot{x}_{k-1}, \ddot{y}_{k-1}, \ddot{z}_{k-1})^T. \quad (2.1.3c)$$

Bei Bewegung des Fahrzeuges lauten die entsprechenden Vektoren und Matrizen wie folgt:

$$\mathbf{X}_k = (x_k, y_k, z_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k, \ddot{x}_k, \ddot{y}_k, \ddot{z}_k)^T, \quad (2.1.4a)$$

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & \frac{1}{2} \Delta t^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & \frac{1}{2} \Delta t^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{1}{6} \Delta t^3 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{6} \Delta t^3 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{6} \Delta t^3 \\ \frac{1}{2} \Delta t^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \Delta t^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t \end{pmatrix}, \quad (2.1.4b)$$

$$\text{und } \Omega_{k-1} = (\ddot{x}_{k-1}, \ddot{y}_{k-1}, \ddot{z}_{k-1})^T. \quad (2.1.4c)$$

2.2 Beobachtungsmodell

Der GPS-Empfänger liefert Pseudoentfernungsmessungen sowohl aus Kode-, als auch Trägerphasenbeobachtungen. Zur Epoche k werden hier die doppelddifferenzierten Pseudoentfernungen (DD-Pseudoentfernungen) und doppelddifferenzierten Phasenraten (DD-Phasenraten) als Beobachtungen im Kalman Filter genutzt. Im folgenden werden der Referenzpunkt und das Fahrzeug mit tiefgestellten Nummern 0 bzw. 1 bezeichnet und der Referenzsatellit mit hochgestellter Nummer 0 dargestellt.

Die DD-Pseudoentfernung lautet (SEEBER (1989, S.284))

$$(\nabla \Delta \rho_{0l}^{oj})_k = (\Delta \rho_{0l}^j)_k - (\Delta \rho_{0l}^0)_k = (\rho_l^j)_k - (\rho_0^j)_k - ((\rho_l^0)_k - (\rho_0^0)_k), \quad (2.2.1)$$

$$j = 1, 2, \dots, n_p$$

mit $(\rho_l^j)_k$ Pseudoentfernungsbeobachtung aus Kodemessungen von Erdpunkt i ($i=0,1$) zu Satellit j zur Epoche k .

Aus den Trägerphasenbeobachtungen der Epochen $k-1$ und $k+1$ wird die Phasenrate zur Epoche k wie folgt gebildet

$$(\dot{\varphi}_l^j)_k = -\frac{C_0}{f_{L_1}} ((\varphi_l^j)_{k+1} - (\varphi_l^j)_{k-1}) / (t_{k+1} - t_{k-1}) \quad (2.2.2)$$

mit $(\varphi_l^j)_{k-1}$, $(\varphi_l^j)_{k+1}$: Phasenbeobachtungen von Erdpunkt i zum Satelliten j zu Epochen $k-1$ und $k+1$; f_{L_1} die Trägerfrequenz L_1 und C_0 die Lichtgeschwindigkeit. Durch Differenzbildung erhält man die DD-Phasenrate

$$(\nabla \Delta \dot{\varphi}_{0l}^{oj})_k = (\Delta \dot{\varphi}_{0l}^j)_k - (\Delta \dot{\varphi}_{0l}^0)_k = (\dot{\varphi}_l^j)_k - (\dot{\varphi}_0^j)_k - ((\dot{\varphi}_l^0)_k - (\dot{\varphi}_0^0)_k), \quad (2.2.3)$$

$$j = 1, 2, \dots, n_\phi.$$

Die zwei verschiedenen Arten von Beobachtungen DD-Pseudoentfernungen und DD-Phasenraten sind seriell korreliert, weisen aber keine Kreuzkorrelation auf.

Für DD-Pseudoentfernungen $(\nabla \Delta \rho_{0l}^{oj})_k$ gilt

$$(\nabla \Delta \rho_{0l}^{oj})_k = (r_l^j)_k - (r_l^0)_k - ((r_0^j)_k - (r_0^0)_k) + (v_p^j)_k, \quad (2.2.4)$$

wobei $(r_l^j)_k$ die geometrische Entfernung zwischen Erdpunkt i und Satelliten j zur Epoche k und $(v_p^j)_k$ der zufällige Fehler von $(\nabla \Delta \rho_{0l}^{oj})_k$ sind. Für die Entfernung gilt

$$(r_l^j)_k = \sqrt{((x_i)_k - (x^j)_k)^2 + ((y_i)_k - (y^j)_k)^2 + ((z_i)_k - (z^j)_k)^2},$$

mit

$$(x_i)_k, (y_i)_k, (z_i)_k : \quad \text{Koordinaten des Erdpunkts } i \ (i=0,1) \text{ zur Epoche } k,$$

$$(x^j)_k, (y^j)_k, (z^j)_k : \quad \text{Koordinaten des Satelliten } j \text{ zur Epoche } k.$$

Im allgemeinen gilt für die Phasenrate (EISSFELLER 1989 S.237)

$$\dot{\Phi}_i^j = (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}^j)^T (\dot{\mathbf{x}}_i - \dot{\mathbf{x}}^j) / r_i^j,$$

$$= \frac{(x_i - x^j)(\dot{x}_i - \dot{x}^j) + (y_i - y^j)(\dot{y}_i - \dot{y}^j) + (z_i - z^j)(\dot{z}_i - \dot{z}^j)}{\sqrt{(x_i - x^j)^2 + (y_i - y^j)^2 + (z_i - z^j)^2}}. \quad (2.2.5)$$

Die Beobachtungsgleichung für die DD-Phasenrate $(\nabla \Delta \dot{\varphi}_{0l}^{oj})_k$ zur Epoche k folgt der Form

$$(\nabla \Delta \dot{\varphi}_{0l}^{oj})_k = (\dot{\Phi}_l^j)_k - (\dot{\Phi}_0^j)_k - [(\dot{\Phi}_l^0)_k - (\dot{\Phi}_0^0)_k] + (v_\phi^j)_k, \quad (2.2.6)$$

wobei $(\dot{\Phi}_i^j)_k$ die nach (2.2.5) berechnete Phasenrate von Erdpunkt i zum Satelliten j zur Epoche k und $(v_\phi^j)_k$ der zufälliger Fehler von $(\nabla\Delta\dot{\Phi}_{ol}^{oj})_k$ sind.

Da zum Zweck der kinematischen Positionsbestimmung die Position und die Geschwindigkeit der Satelliten als bekannte Größen gehalten werden sollen, gelten in (2.2.4) und (2.2.6) lediglich die Orts- und Geschwindigkeitsvektoren $(x_I)_k$ und $(\dot{x}_I)_k$ des Fahrzeuges als Unbekannten. Es seien

$$(x_I)_k = x_k^0 + \delta x_k, \quad (\dot{x}_I)_k = \dot{x}_k^0 + \delta \dot{x}_k,$$

wobei x_k^0, \dot{x}_k^0 die Näherungswerte der Orts- und Geschwindigkeitsvektoren des Fahrzeuges zur Epoche k und $\delta x_k, \delta \dot{x}_k$ deren Verbesserungen sind. Sollen (2.2.4) und (2.2.6) um x_k^0 und \dot{x}_k^0 linearisiert, so folgen daraus die Beobachtungsgleichungen

$$(l_p^j)_k = (a_x^j)_k^p \delta x_k + (a_y^j)_k^p \delta y_k + (a_z^j)_k^p \delta z_k + (v_p^j)_k \quad (2.2.7)$$

$j = 1, 2, \dots, n_p$, für DD-Pseudoentfernungen,

$$\text{und} \quad (l_\phi^j)_k = (a_x^j)_k^\phi \delta x_k + (a_y^j)_k^\phi \delta y_k + (a_z^j)_k^\phi \delta z_k + (a_{\dot{x}}^j)_k^\phi \delta \dot{x}_k + (a_{\dot{y}}^j)_k^\phi \delta \dot{y}_k + (a_{\dot{z}}^j)_k^\phi \delta \dot{z}_k + (v_\phi^j)_k \quad (2.2.8)$$

$j = 1, 2, \dots, n_\phi$, für DD-Phasenraten,

mit

$$\begin{aligned} (a_x^j)_k^p &= (x_k^0 - (x^j)_k) / (r_I^j)_k^0 - (x_k^0 - (x^0)_k) / (r_I^0)_k^0, \\ (a_y^j)_k^p &= (y_k^0 - (y^j)_k) / (r_I^j)_k^0 - (y_k^0 - (y^0)_k) / (r_I^0)_k^0, \\ (a_z^j)_k^p &= (z_k^0 - (z^j)_k) / (r_I^j)_k^0 - (z_k^0 - (z^0)_k) / (r_I^0)_k^0, \\ (l_p^j)_k &= (\nabla\Delta\rho_{ol}^{oj})_k - [(r_I^j)_k^0 - (r_o^j)_k^0] - [(r_I^0)_k^0 - (r_o^0)_k^0], j = 1, 2, \dots, n_p. \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} (a_x^j)_k^\phi &= \left(\frac{\partial(\dot{\Phi}_I^j)_k}{\partial x_k} - \frac{\partial(\dot{\Phi}_I^0)_k}{\partial x_k} \right), & (a_{\dot{x}}^j)_k^\phi &= \left(\frac{\partial(\dot{\Phi}_I^j)_k}{\partial \dot{x}_k} - \frac{\partial(\dot{\Phi}_I^0)_k}{\partial \dot{x}_k} \right), \\ (a_y^j)_k^\phi &= \left(\frac{\partial(\dot{\Phi}_I^j)_k}{\partial y_k} - \frac{\partial(\dot{\Phi}_I^0)_k}{\partial y_k} \right), & (a_{\dot{y}}^j)_k^\phi &= \left(\frac{\partial(\dot{\Phi}_I^j)_k}{\partial \dot{y}_k} - \frac{\partial(\dot{\Phi}_I^0)_k}{\partial \dot{y}_k} \right), \\ (a_z^j)_k^\phi &= \left(\frac{\partial(\dot{\Phi}_I^j)_k}{\partial z_k} - \frac{\partial(\dot{\Phi}_I^0)_k}{\partial z_k} \right), & (a_{\dot{z}}^j)_k^\phi &= \left(\frac{\partial(\dot{\Phi}_I^j)_k}{\partial \dot{z}_k} - \frac{\partial(\dot{\Phi}_I^0)_k}{\partial \dot{z}_k} \right), \\ (l_\phi^j)_k &= (\nabla\Delta\dot{\Phi}_{ol}^{oj})_k - (\nabla\Delta\dot{\Phi}_{ol}^{oj})_k^0 \\ &= (\nabla\Delta\dot{\Phi}_{ol}^{oj})_k - [((\dot{\Phi}_I^j)_k^0 - (\dot{\Phi}_o^j)_k^0) - ((\dot{\Phi}_I^0)_k^0 - (\dot{\Phi}_o^0)_k^0)], \end{aligned}$$

wobei gelten

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial(\dot{\Phi}_I^j)_k}{\partial x_k} &= (\dot{x}_k^0 - (\dot{x}^j)_k) / (r_I^j)_k^0 - (x_k^0 - (x^j)_k)^2 (\dot{x}_k^0 - (\dot{x}^j)_k) / ((r_I^j)_k^0)^3 \\ \frac{\partial(\dot{\Phi}_I^j)_k}{\partial y_k} &= (\dot{y}_k^0 - (\dot{y}^j)_k) / (r_I^j)_k^0 - (y_k^0 - (y^j)_k)^2 (\dot{y}_k^0 - (\dot{y}^j)_k) / ((r_I^j)_k^0)^3 \\ \frac{\partial(\dot{\Phi}_I^j)_k}{\partial z_k} &= (\dot{z}_k^0 - (\dot{z}^j)_k) / (r_I^j)_k^0 - (z_k^0 - (z^j)_k)^2 (\dot{z}_k^0 - (\dot{z}^j)_k) / ((r_I^j)_k^0)^3 \end{aligned} \right.$$

$$\begin{cases} \frac{\partial(\Phi_I^j)_k}{\partial \dot{x}_k} = (x_k^0 - (x^j)_k) / (r_I^j)_k^0 \\ \frac{\partial(\Phi_I^j)_k}{\partial \dot{y}_k} = (y_k^0 - (y^j)_k) / (r_I^j)_k^0 \\ \frac{\partial(\Phi_I^j)_k}{\partial \dot{z}_k} = (z_k^0 - (z^j)_k) / (r_I^j)_k^0 \end{cases}$$

$$(r_o^j)_k = \sqrt{(x_o - (x^j)_k)^2 + (y_o - (y^j)_k)^2 + (z_o - (z^j)_k)^2},$$

$$(r_I^j)_k^0 = \sqrt{(x_k^0 - (x^j)_k)^2 + (y_k^0 - (y^j)_k)^2 + (z_k^0 - (z^j)_k)^2},$$

sowie $(\Phi_o^j)_k = -(x_o - (x^j)_k)^T (\dot{x}^j)_k / (r_o^j)_k,$

$$(\dot{\Phi}_I^j)_k^0 = (\dot{x}_k^0 - (\dot{x}^j)_k)^T (\dot{x}_k^0 - (\dot{x}^j)_k) / (r_I^j)_k^0.$$

Hier sind x_o der Ortsvektor des Referenzpunkts und $(x^j)_k, (\dot{x}^j)_k$ die Orts- und Geschwindigkeitsvektoren des Satelliten j zur Epoche k .

3 Numerische Beispiele

3.1 Beschreibung der Testfahrten

Am Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München wurden im Rahmen des Projektes KiSS zahlreiche Testfahrten unter unterschiedlichen Meßbedingungen durchgeführt und die Daten mit dem vorgestellten Verfahren ausgewertet. Aus Platzgründen werden im folgenden von den Testfahrten lediglich zwei Datensätze ausgewählt, die unter idealer und normaler Meßbedingung gewonnen sind. Die erste Fahrt 023c fand auf dem Neubiberger Flugplatz statt, während die zweite Fahrt 129b durch Felder, Ortslage, Brücken und Wälder führte. Tabelle 3.1 und Abbildung 3.1 geben einen Überblick über die beiden Testfahrten.

Tabelle 3.1: Überblick der Testfahrten

Fahrt	Datum	F (HZ)	Streckenlänge(km)	Dauer(Min.)
023c	23.01.1996	1	5.9	28
129b	08.05.1997	5	37.0	65

In Tabelle 3.1 ist F die Frequenz der Datenerfassung.

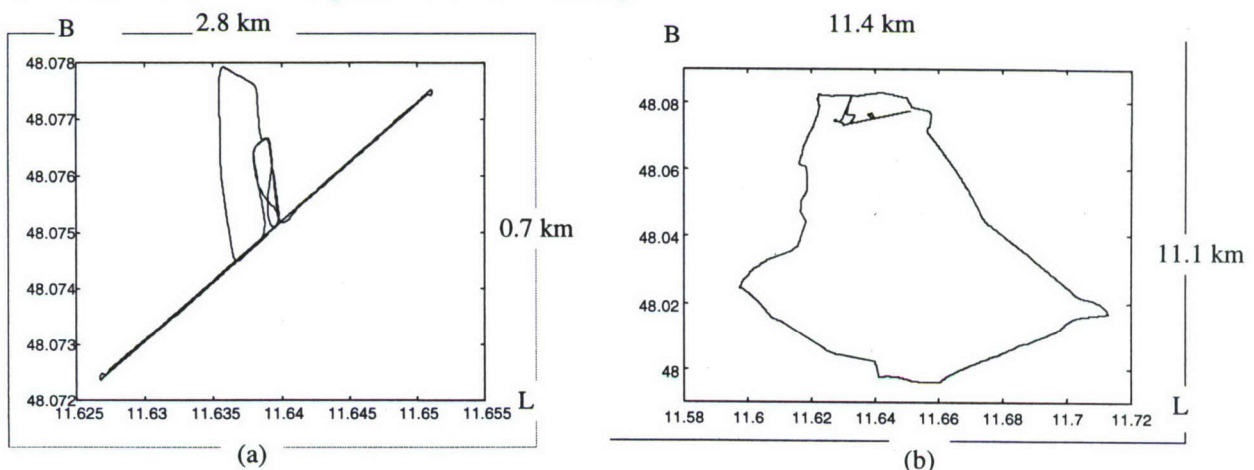


Abb. 3.1: Trajektorien der Testfahrten: (a) 023c; (b) 129b

Da die erste Fahrt 023c unter optimalen Bedingungen (mindestens 6 Satelliten auf beiden Stationen sichtbar, kein Signalabriß) durchgeführt wurde, ist die Bestimmung der Mehrdeutigkeitsunbekannten bei der Phasenmessung (OTF-'on the fly') möglich und so eine vollständige Soll-Trajektorie erhältlich. Demgegenüber trat bei der Fahrt 129b häufig Signalabriß ein; folglich ist die OTF-Lösung für diese Fahrt nur stückweise möglich.

3.2 Ergebnisse und Analyse

In 2.1 und 2.2 wurden die Grundlagen zur Auswertung der GPS Daten mit Kalman Filter geliefert. Um das Kalman Filter anwenden zu können, sind weitere unbekannte Größen zu bestimmen. Dies sind: (1) Standardabweichungen der Beobachtungen; (2) Anfangswerte des Zustandsvektors sowie dessen Kovarianzmatrix; (3) die Kovarianzmatrix des Modellrauschens.

Da zwei unterschiedliche Arten von Beobachtungen bei der die Auswertung auftreten, ist es erforderlich, das Varianzverhältnis dieser Beobachtungsarten plausibel zu bestimmen. Die GPS Card liefert zwar außer den Beobachtungen auch deren Standardabweichungen. Zahlreiche Proberechnungen zeigten aber, daß die von der GPS Card angegebene Standardabweichung der Pseudoentfernung oft kleiner als die tatsächliche und zur Auswertung der GPS Daten nicht geeignet ist. In JIN (1996, S.61-65) wurde vorgeschlagen, die Standardabweichungen von Phasen und Pseudoentfernungen nach Satellitenelevation zu ermitteln, und zwar mit dem Ansatz

$$\sigma_{ip}^j = a_0 + a_1 \exp(-E_i^j / E_0), \quad (3.2.1)$$

$$\sigma_{i\varphi}^j = b_0 + b_1 \exp(-E_i^j / E_0). \quad (3.2.2)$$

Hierbei sind σ_{ip}^j und $\sigma_{i\varphi}^j$ die Standardabweichungen von Phasen- und Pseudoentfernungsbeobachtungen zwischen Erdpunkt i und Satelliten j ; a_0 , a_1 , b_0 , b_1 und E_0 die empirisch zu bestimmenden Konstanten und E_i^j die Elevation des Satelliten j bezüglich des Erdpunktes i .

Die Datensätze der beiden Testfahrten wurden sowohl mit Vorwärtsfilter, als auch mit Rückwärtsfilter und Glättung ausgewertet und in geographische Koordinaten (B, L, H) transformiert. Die so gewonnenen Ergebnisse werden dann mit den OTF-Lösungen verglichen. In Abbildungen 3.2.1-3.2.4 werden die Abweichungen d_B , d_L und d_H der geschätzten B, L und H der beiden Testfahrten gegenüber der entsprechenden OTF-Lösungen dargestellt. In Abbildungen 3.2.2-3.2.4 wurden die Abweichungen lediglich von solchen Epochen dargestellt, bei denen die OTF-Lösung vorhanden ist. Aus den Abweichungen werden die Standardabweichungen M_B , M_L und M_H geschätzt und in Tabelle 3.2.1 zusammengefaßt. In dieser Tabelle sind die Daten unter G., S. und B. die Standardabweichung der **G**anzen Fahrt, die bei **S**tillstand sowie bei **B**ewegung des Fahrzeuges.

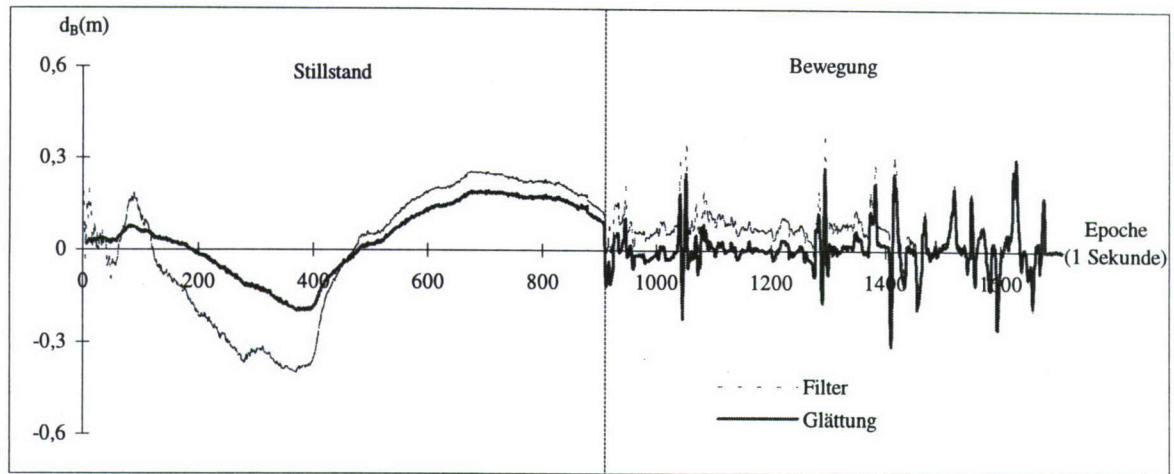
Tabelle 3.2.1: Standardabweichung der Testergebnisse

Fahrt	Verfahren	M _B (Breite) (m)			M _L (Länge) (m)			M _H (Höhe) (m)		
		G.	S.	B.	G.	S.	B.	G.	S.	B.
023c	Filter	0.166	0.210	0.095	0.156	0.104	0.199	0.169	0.195	0.139
	Glättung	0.099	0.120	0.068	0.134	0.081	0.175	0.135	0.090	0.172
129b	Filter	0.210	0.145	0.250	0.392	0.245	0.482	0.620	0.792	0.426
	Glättung	0.151	0.056	0.199	0.357	0.126	0.471	0.475	0.320	0.573

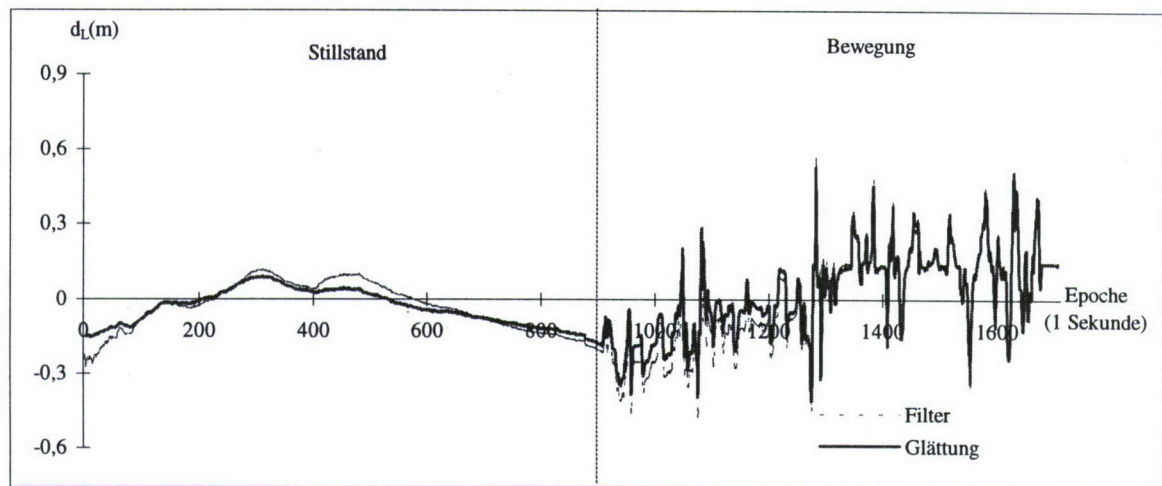
Weiterhin wird die mit dem Vorwärtsfilter geschätzte Geschwindigkeit beim Stillstand des Fahrzeuges mit dem Sollwert (Null) verglichen. Das Ergebnis wird in Tabelle 3.2.2 gezeigt.

Tabelle 3.2.2: Vergleich der geschätzten Geschwindigkeit beim Stillstand mit dem Sollwert

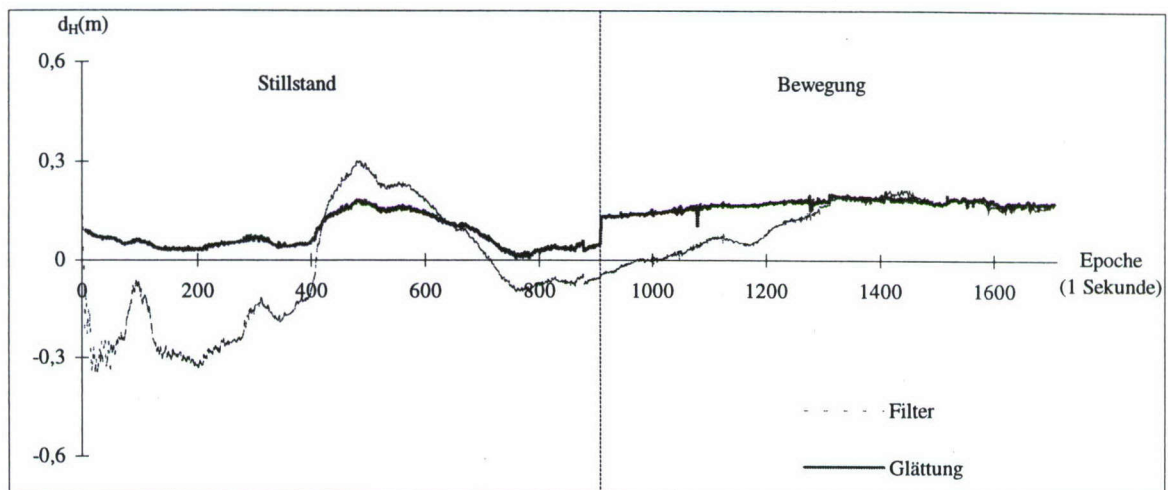
Fahrt	Verfahren	Mittelwert (mm/s)			Standardabweichung (mm/s)		
		V _B	V _L	V _H	M _{VB}	M _{VL}	M _{VH}
023c	Filter	-0.13	-0.02	0.32	3.7	1.4	10.4
129b	Filter	0.00	-0.11	0.04	4.7	5.6	12.5



(a)



(b)



(c)

Abb. 3.2.1: Abweichungen der geschätzten Breite (a), Länge (b) und Höhe (c) gegenüber der OTF-Lösung von Fahrt 023c

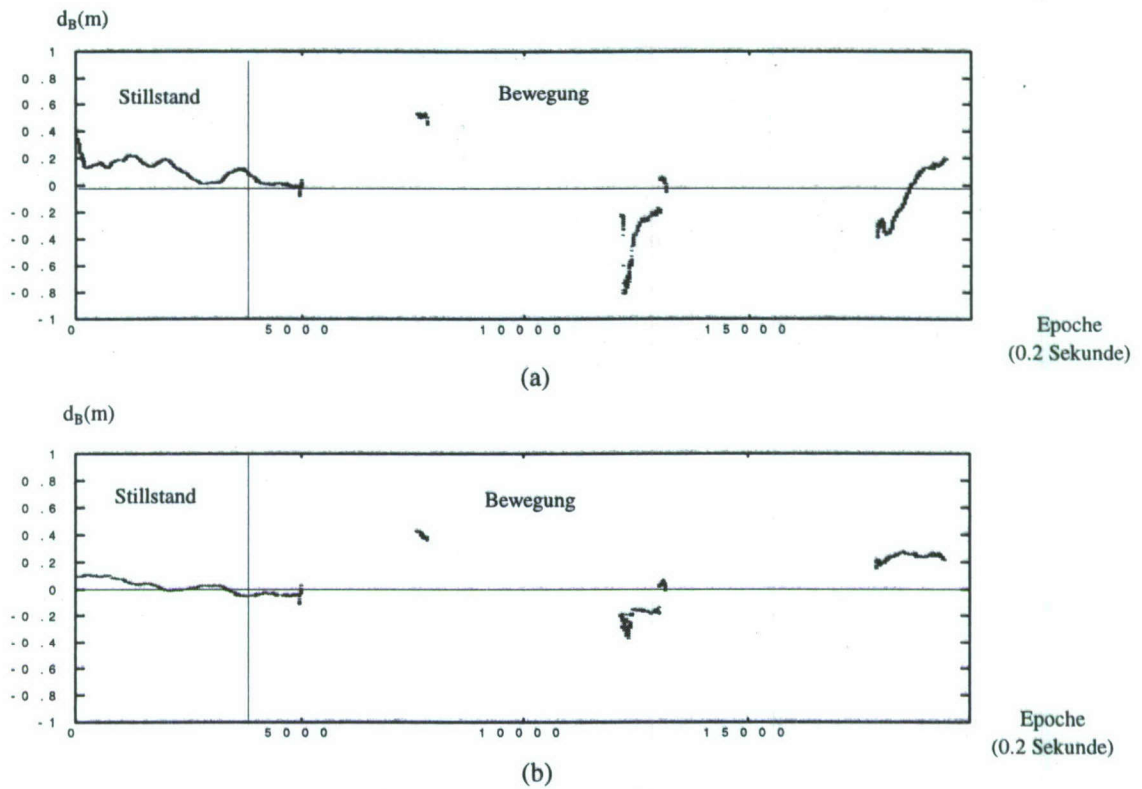


Abb. 3.2.2: Abweichung der geschätzten Breite der Fahrt 129b gegenüber der OTF-Lösung; (a) Filter; (b) Glättung

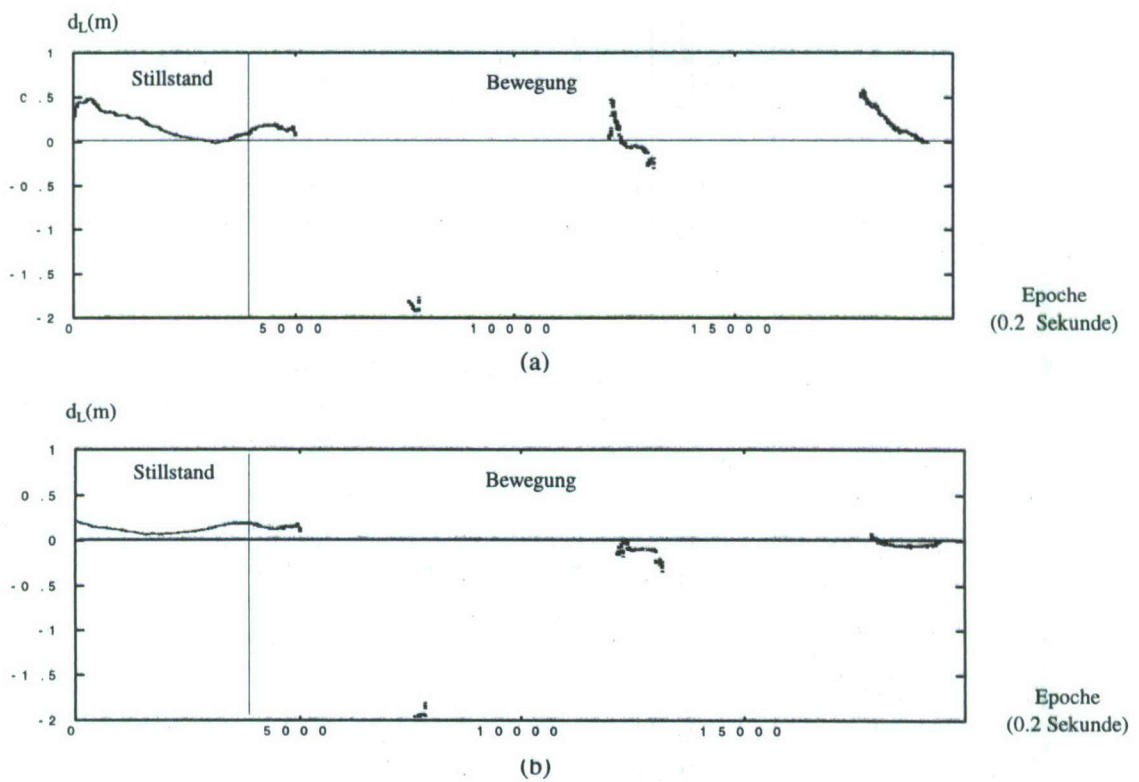


Abb. 3.2.3: Abweichung der geschätzten Länge der Fahrt 129b gegenüber der OTF-Lösung; (a) Filter; (b) Glättung

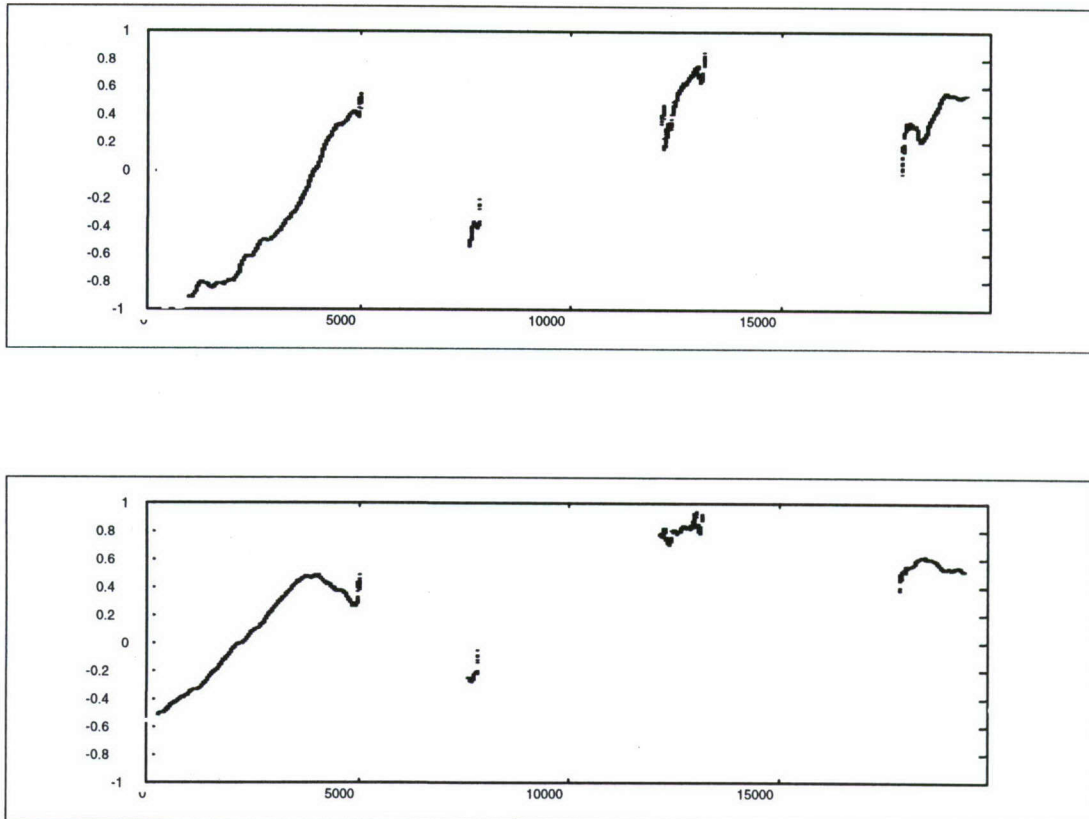


Abb. 3.2.4: Abweichung der geschätzten Höhe der Fahrt 129b gegenüber der OTF-Lösung: (a) Filter; (b) Glättung

An Tabellen 3.2.1-3.2.2 und Abbildungen 3.2.1-3.2.4 (und auch an anderen zahlreichen Testergebnissen, die hier aus Platzgründen nicht präsentiert werden können) ist zu erkennen:

- bei optimaler Meßbedingung ist eine Positionierungsgenauigkeit von $\pm 0.3\text{m}$ erreichbar; bei normaler Meßbedingung ist die Positionierungsgenauigkeit in der Lage von $\pm 0.5\text{m}$ zu erwarten,
- durch Glättung wird die Positionierungsgenauigkeit wesentlich verbessert. Die Standardabweichung der dreidimensionalen Position in der Fahrt 023c wird von $\pm 0.28\text{m}$ auf $\pm 0.21\text{m}$ und bei der Fahrt 129b von $\pm 0.76\text{m}$ auf $\pm 0.63\text{m}$ verkleinert; die gute Auswirkung der Glättung wird insbesondere bei Stillstand erkennbar,
- bei Wendepunkten der Fahrt sind die Abweichungen (Spitzen in Abbildungen 3.2.1(a) und 3.2.1(b)) deutlich größer als bei anderen Punkten (die größten Werte liegen bei $\pm 0.5\text{m}$). Dies ist einerseits vom Zustandsmodell und vom Modell- und Meßrauschverhältnis abhängig, andererseits liegt es an den Eigenschaften des Kalman Filters. Mit höherer Datenerfassungsfrequenz könnten solche Spitzenwerte möglicherweise verringert werden,
- bei Fahrt 129b liegen die meisten Abweichungen innerhalb von $\pm 0.6\text{m}$ (siehe Abbildungen 3.2.2-3.2.4). Eine Ausnahme bilden die Abweichungen in der Länge zwischen Epoche 7600-7830 (46 Sekunden). Die größere Abweichung liegt möglicherweise daran, daß durch Signalabriß die Anfangswerte des Kalman-Filters ungeeignet geschätzt wurden, oder bei OTF-Lösung die Phasenmehrdeutigkeit nicht richtig bestimmt werden konnte, da auf dieser Teilstrecke meistens nur 4-5 Satelliten auf der Fahrzeugstation empfangen werden konnten.

Da die OTF-Lösung keine Angabe der Geschwindigkeit liefert, wurde die geschätzte Fahrzeuggeschwindigkeit lediglich beim Fahrzeugstillstand mit dem Sollwert Null verglichen. Tabelle 3.2.2 zeigt, daß die Standardabweichung der geschätzten Geschwindigkeit beim Fahrzeugstillstand ca. bei 0.01m/s liegt. In Anbetracht der Tatsache, daß die Meßbedingung beim Fahrzeugstillstand nahezu optimal ist, wäre eine Standardabweichung der geschätzten Geschwindigkeit bei Fahrzeugbewegung von 0.05m/s eher realistisch.

4 Schlußbemerkung

In diesem Beitrag wird der Einsatz des Kalman-Filters zur Auswertung kinematischer GPS-Daten erörtert. Dieses Verfahren stützt sich hauptsächlich auf Pseudoentfernungsbeobachtungen in Kombination mit Phasenraten. Die Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeit ist hierbei nicht nötig. Durch die Doppeldifferenzbildung der Beobachtungen ist der Einfluß von Uhrfehlern und von Fehlern bei der Satellitenbahnbestimmung stark verringert. Mit diesem Verfahren ist eine Genauigkeit der Lagebestimmung eines Landfahrzeuges von 0.5m möglich. Da dieses Verfahren außer der Fahrzeugposition auch die Geschwindigkeit mit plausibler Genauigkeit schätzt, ist es geeignet zur Auswertung kinematischer GPS Daten. Die OTF-Lösung liefert die Fahrzeugposition zwar mit höherer Genauigkeit, aber dieses Verfahren kann nur unter günstigen Bedingungen (kein Signalabriß, mindestens 4 Satelliten ständig sichtbar) eingesetzt werden. Außerdem liefern die kommerziellen OTF-Lösungen keine Schätzwerte für die Geschwindigkeit. Zur kinematischen Positionbestimmung eines Meßfahrzeuges ist dieses Verfahren daher weniger geeignet. Anderen Auswertungsverfahren wurden ebenfalls untersucht, z.B. mit einfach differenzierten Pseudoentfernungen (SD-GPS), mit doppel-differenzierten Pseudoentfernungen (DD-GPS), sowie mit phasengeglätteten Pseudoentfernungen. Die Ergebnisse belegten, daß die Positionierungsgenauigkeit der ersten beiden Verfahren (SD-GPS, DD-GPS) nicht besser als ein Meter ist. Mit phasengeglätteten Pseudoentfernungen kann man zwar eine ähnliche Positionierungsgenauigkeit wie mit dem Kalman-Filter erhalten, aber dieses Verfahren liefert keine Schätzwerte für die Fahrzeuggeschwindigkeit. Es ist daher zur Auswertung kinematischer GPS Daten weniger geeignet. Anzumerken ist jedoch, daß das Kalman-Filter, vor allem die Kombination von Vorwärts-, Rückwärts- und Glättungsverfahren, im Vergleich zu den anderen Verfahren sehr zeitaufwendig ist. Es ist daher erstrebenswert, effizientere Algorithmen zu entwickeln.

5 Literaturverzeichnis

- CHUI, C.K., CHEN, G.: *Kalman Filtering with Real-Time Application*. Springer-Verlag, Berlin, 1987
- VAN DIERENDONCK, A.J., RUSSELL, S.S., KOPITZKE, E.R. and BIRNBAUM, M.: The GPS Navigation Message. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 25, 147-165, 1978
- EISSFELLER, B.: *Analyse einer geodätischen raumstabilisierten Inertialplattform und Integration mit GPS*. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen UniBwM, Heft 37, München, 1989
- HATCH, R.: The Synergism of GPS Code and Carrier Measurement. *Proceedings of the Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning*. Las Cruces, 1213-1232, 1982
- JIN, X.X.: *Theory of Carrier Adjusted DGPS Positioning Approach and some Experimental Results*. Delft University Press, Delft, 1996
- KLENSBERG, A.: Kinematic Relative Positioning Using GPS Code and Carrier Beat Phase Observations. *Marine Geodesy*, 10, 257-274, 1986
- LACHAPELLE, G., FALKENBERG, W. and CASEY, M.: Use of Phase Data for Accurate Differential GPS Kinematic Positioning. *Bulletin Geodesique*, 61, 257-274, 1987

LANDAU, H., EISSFELLER, B.: Optimization of GPS Satellite Selection for High Precision Differential Positioning. *Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen* UniBwM, Heft 19, 65-86, München, 1986

LEICK, A.: *GPS Satellite Surveying*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995

SCHRICK, K.W.: *Anwendung der Kalman-Filter-Technik., Anleitung und Beispiel*. Oldenbourg Verlag, München, 1977

SEEBER, G.: *Satellitengeodäsie*. Walter de Gruyter, Berlin, 1989

SCHWARZ, K.P., CANNON, M.E. and WONG, R.V.C.: A comparison of GPS kinematic models for the determination of position and velocity along a trajectory. *manuscripta geodaetica*, 14, 345-353, 1989

TEUNISSEN, P.J.G.: The GPS Phase-adjusted Pseudorange. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on High Precision Navigation*, Stuttgart/Freudenstadt, BRD, 115-125, 1991

DIE LEHRVERANSTALTUNG „VERMESSUNGSKUNDE FÜR BAUINGENIEURE“ AN DER FACHHOCHSCHULE REGENSBURG

Prof. Dr.-Ing. Axel Geiger

Fachbereich Bauingenieurwesen

Fachhochschule Regensburg

Prüfeninger Straße 58

93049 Regensburg

Zusammenfassung

Die Lehrveranstaltung „Vermessungskunde für Bauingenieure“ nimmt an der Fachhochschule Regensburg eine wichtige Stellung ein. Die Bedeutung wird vom Fachbereich Bauingenieurwesen anerkannt und unterstützt. Die Instrumentenausstattung ist auf dem neuesten Entwicklungsstand. Die theoretische und praktische Ausbildung befähigt die Absolventen, selbständig die vielseitigen Vermessungsarbeiten im Bauwesen durchzuführen.

1 Die Fachhochschule Regensburg

1.1 Geschichte

Die Fachhochschule Regensburg wurde 1971 gegründet, wobei ihre Vorläufereinrichtungen bis zum Beginn des vergangenen Jahrhunderts zurückreichen. Ursprünglich als „Bauschule“ gegründet, wurde 1958 das Johannes-Kepler-Polytechnikum mit den Abteilungen Hochbau, Tiefbau, Maschinenbau und Elektrotechnik ins Leben gerufen.

Die Fachhochschule Regensburg gliedert sich in die Ausbildungsrichtungen Technik (Studiengänge Architektur, Bauingenieurwesen, Elektrotechnik, Allgemeinwissenschaften und Mikrosystemtechnik, Informatik und Mathematik, Maschinenbau), Wirtschaft (Betriebswirtschaft, Europäische Betriebswirtschaft, Aufbaustudiengang Wirtschaftsingenieurwesen), und Sozialwesen (Studiengang Soziale Arbeit). Leider ist die Fachhochschule Regensburg auf drei Standorte verteilt, allerdings mit dem Ziel, langfristig den gemeinsamen Standort Seybothstraße neben der Universität Regensburg zu erreichen.

Derzeit sind ca. 5000 Studierende in 13 Studiengängen eingeschrieben. Damit ist die Fachhochschule Regensburg die drittgrößte in Bayern.

2 Der Fachbereich Bauingenieurwesen

Im Fachbereich Bauingenieurwesen sind derzeit 540 Studierende eingeschrieben. Die meisten besitzen die Fachhochschulreife. Es ist zu beobachten, daß der Anteil der Gymnasiasten immer größer wird. Eine abgeschlossene Lehre können ungefähr 40 % aller Studierenden nachweisen. Der weibliche Anteil beträgt ca. 10 %. Es besteht ein Numerus Clausus, so daß zum Studienbeginn im Wintersemester nur 120 Studierende aufgenommen werden können. Das Wintersemester beginnt am 01. Oktober und endet am 15. Februar, das Sommersemester beginnt am 15. März und endet am 31. Juli. Die Regelstudienzeit beträgt 8 Semester, davon im Grundstudium zwei theoretische Studiensemester (Abschluß: Diplom-Vorprüfung) und im Hauptstudium vier theoretische und zwei praktische Studiensemester (im 3. und 6. Fachsemester). Die durchschnittliche Studiendauer beträgt ca. 9 Semester. Der Abschluß ist die Diplomhauptprüfung mit dem Titel Dipl.-Ing. (FH) für Bauingenieurwesen. Im Grundstudium gibt es drei Parallelsemester, im Hauptstudium zwei. Derzeit lehren 15 hauptamtliche Professoren und sieben Lehrbeauftragte. Unterstützend sind zwei Ingenieure und sieben Werkmeister tätig, die für 11 Labore und Praktikas zuständig sind.

3 Lehrveranstaltung Vermessungskunde

3.1 Allgemeines

Nach einer siebenjährigen Tätigkeit von 1976 - 83 an der Universität der Bundeswehr in Neubiberg am Lehrstuhl Prof. Dr.-Ing. W. Caspary wurde ich im Wintersemester 1983 im Fachbereich Bauingenieurwesen zum Professor für Darstellende Geometrie und Vermessungskunde für Bauingenieure berufen. Ich wurde als einziger Geodät im Fachbereich sehr gut aufgenommen und unter meinen neuen Bauingenieurkollegen anerkannt. Meine anfängliche Befürchtung, daß die Vermessungskunde nicht so ernst genommen würde und ich bei der Mittelverteilung zu kurz kommen würde, haben sich in keiner Weise bewahrheitet.

3.2 Vorlesungen, Praktika

Es ist von großem Vorteil, daß die Lehrveranstaltungen im Hauptstudium stattfinden. Die Studierenden haben dann bereits ihr 1. praktisches Studiensemester, das sie auf der Baustelle ableisten, abgeschlossen. Sie kommen dort meistens zum ersten Mal mit der Vermessungskunde in Berührung und erkennen dabei, daß auf der Baustelle ohne Vermessung „nichts geht“. Die Vorlesungen finden im 4. Semester (Sommersemester) und 5. Semester (Wintersemester) mit jeweils einer Doppelstunde pro Woche statt. Die Semesterstärke beträgt jeweils 40 - 50 Studierende, verteilt auf zwei Parallelsemester. Vorlesungsbegleitend finden im SS und WS 12 Praktika statt. Die Einteilung erfolgt in acht Gruppen mit ca. 12 Studierenden. Diese werden nochmals in 2 - 3 Untergruppen aufgeteilt, so daß sich jeder Studierende aktiv an den Meßaufgaben beteiligen kann. Für jede Untergruppe steht ein Betreuer (Professor, Lehrbeauftragter, Labor-Ingenieur, Werkmeister) zur Verfügung. Als Übungsgelände habe ich ein von der Fachhochschule ca. zwei km entferntes, wunderbar gelegenes Freizeitgelände an der Donau, das ich in fünf Minuten von zu Hause per Fahrrad erreichen kann, ausgesucht. Das Gelände wird seit 1983 für alle Außenübungen intensiv genutzt. Gemessen wird bei (fast) jedem Wetter. Im Durchschnitt muß nur ein Termin pro Semester wegen Regen verlegt werden (in Regensburg regnet es sehr wenig!). Die Praktika sind bei den Studierenden recht beliebt. Ein Biergartenbesuch nach dem letzten Praktikum im Sommer ist bereits eine feste Veranstaltung. Die Erfahrungen bei der Durchführung der Vermessungskundepraktika für Bauingenieure, die ich an der Technischen Universität München und der Universität der Bundeswehr gesammelt habe, waren für die Aufgaben an der Fachhochschule Regensburg sehr wertvoll.

3.3 Labor für Vermessungskunde

3.3.1 Instrumentenausstattung

Im Keller der Fachhochschule befindet sich das Labor für Vermessungskunde, welches leider viel zu klein ist und aus allen Nähten platzt. Dort befinden sich sowohl die Instrumentensammlung als auch die Work Stations mit Peripherie (Laserdrucker, Tintenstrahlplotter, Digitizer, Scanner). Die Instrumentenausstattung ist als sehr gut zu bezeichnen. Neben vielen älteren analogen Theodoliten, Tachymetern und Nivellieren besitzt der Fachbereich eine große Anzahl digitaler Theodolite, Tachymeter (Zeiss, Geodimeter, Leica), Nivelliere (Leica, Zeiss) und Laser (Spectra Physics, Wild), die auch bei den Praktika zum Einsatz kommen. In der Ausbildung sollen die älteren klassischen Meßmethoden (auf der Baustelle haben Bandmaß und Winkelprisma noch nicht ausgedient!) als auch die modernen Verfahren und Instrumente behandelt und verwendet werden. Es stehen mehrere Workstations mit umfangreichen Softwareprogrammen zur Verfügung. Die vermessungstechnischen Berechnungen werden seit 12 Jahren hauptsächlich mit dem Programm „HCE“ (Haas-Consult-Eckhardt, Hannover), die Bestandsplanerstellung seit einiger Zeit mit dem Programmsystem RIB-STRATIS durchgeführt.

3.4 Wahlpflichtfach Vermessungskunde II

Seit einigen Jahren biete ich im 7. Semester als Wahlpflichtfach „Ausgewählte Kapitel der Ingenieurvermessung“ an. Auf Grund der hohen Nachfrage und der begrenzten Kapazität an Rechnern, Instrumenten und Betreuern muß die Zahl der Studierenden auf 20 begrenzt werden. In dieser Lehrveranstaltung wird besonders auf die Registrierung der Meßdaten und Auswertung mit CAD eingegangen. Es werden auch Fremdvorträge mit Instrumentenvorführungen abgehalten sowie Messungen (z. B. GPS) und Exkursionen zu interessanten Bauwerken durchgeführt.

3.5 Diplomarbeiten

Die Nachfrage nach Diplomarbeiten im Fach Vermessungskunde steigt von Jahr zu Jahr. Es liegt u. a. daran, daß

- a) die Vermessungskunde bereits nach dem 5. Semester abgeschlossen ist,
- b) die Vermessungskunde auf allen Gebieten des Faches Bauingenieurwesen benötigt wird,
- c) die Studierenden gerne eine praktische Arbeit im Gelände durchführen und dann mit dem Computer auswerten,
- d) die fertigen Bauingenieure immer öfter Vermessungsarbeiten selbst durchführen müssen,
- e) eine optimale Betreuung gewährleistet ist.

Die Arbeiten werden meist von zwei Studierenden gemeinsam durchgeführt. Die Betreuung der Diplomarbeiten (z. B. im Falle einer Bestandsplanerstellung) ist allerdings sehr aufwendig (Einweisung in den elektronischen Tachymeter mit Registrierung, Besichtigungen, Polygonzuanlage, Geländeaufnahme mit Codierung, Auswertung mit CAD). Meist schließt sich an die Vermessungsarbeiten noch eine Planung an (z. B. Baugebiet, Straßen, Kanal, Wasserbau etc.), die dann von Kollegen mitbetreut wird. Pro Studienjahr werden von mir durchschnittlich 10 - 15 Studierende betreut. Das Niveau der Arbeiten hat sich durch die CAD-Entwicklung in den letzten Jahren und den Einsatz der Studierenden (gute Noten in den Abschlußzeugnissen werden bei der Stellensuche immer wichtiger) ständig gesteigert. Einige der Diplomarbeiten wurden sogar prämiert und mit Geldpreisen versehen.

3 Bedeutung der Vermessungskunde im Bauwesen

Für den Bauingenieur hat die Vermessungskunde in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Dies hat sicherlich mehrere Gründe. Ein Grund ist, daß die jungen Absolventen, von denen ungefähr jeder zweite eine Bauleitungsaufgabe übernimmt, immer Vermessungsarbeiten (z. B. Höhenmessungen, Absteckungen, Abrechnungen) selbst durchführen müssen. Für viele Baufirmen ist es gerade in der jetzigen schwierigen Konjunktur zu teuer, ein Vermessungsbüro dafür zu beauftragen. Hinzu kommt, daß heute auch kleinere Baufirmen und Planungsbüros, auf Grund günstiger Preise, mit registrierenden Tachymetern, Auswertesoftware und Plottern ausgestattet sind, mit denen größtenteils Bauingenieure arbeiten. Einige Absolventen haben gerade in jüngster Zeit eine Stelle bekommen, da sie ihre Diplomarbeit im Fach Vermessungskunde anfertigten und Erfahrung auf dem CAD-Gebiet nachweisen konnten.

Wichtig ist mir auch der Kontakt zu Baufirmen, Ingenieurbüros und ehemaligen Studierenden, um zu erfahren, welche Vermessungsaufgaben vorwiegend von Bauingenieuren durchgeführt werden. Ebenfalls von Bedeutung ist für mich die aktive Beteiligung an Projekten, an denen Bau- und Vermessungsingenieure mitarbeiten. Auch die Erfahrungen, die ich als öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Ingenieurvermessung bei Gutachtenerstellungen gewonnen habe, fließen direkt in die Lehrveranstaltung ein. Für Forschungsvorhaben gibt es an der Fachhochschule fast keine Einrichtungen und kein Personal. Bei einer wöchentlichen Belastung von 18 Stunden, mit ca. 100 Studierenden und 15 Diplomanden ist das kaum möglich.

4 Resümee

Langjährige Erfahrungen bei der Betreuung von Bauingenieurstudierenden an der Technischen Universität München und an der Universität der Bundeswehr haben mir bei meinen vielseitigen Aufgaben als Professor für Vermessungskunde sehr geholfen. Ich habe im Fachbereich Bauingenieurwesen an der Fachhochschule Regensburg als Geodät ein ideales Aufgabengebiet und Umfeld gefunden. Die Arbeit mit den Bauingenieurkollegen, Mitarbeitern und Studierenden macht viel Spaß und erhält so

jung und dynamisch. Ich hoffe, daß dieser Zustand noch einige Jahre bis zu meiner Pensionierung erhalten bleibt.

EINFACHE UND SCHNELLE PRÜFUNG VON GPS-ANTENNEN

Dr.-Ing. Hans Glasmacher

Schneggstraße 7
85354 Freising

Zusammenfassung

Mit schnellen Real-Time-Kinematik- und Stop&Go-Messverfahren wird inzwischen annähernd Zentimetergenauigkeit erreicht. Dabei wird zudem auf die früher übliche Nord-Ausrichtung der GPS-Antennen verzichtet, oft werden auch unterschiedliche Antennentypen kombiniert.

Zur Abschätzung der durch eventuelle Unsymmetrien der Phasenzentren der Antennen verursachten Fehler wird eine einfache, von jedem Benutzer schnell selbst durchführbare Messmethode vorgestellt. Durch Drehung der Antenne innerhalb kurzer Zeitabstände wird der Effekt unterschiedlicher Satellitenkonfigurationen vermindert und eventuelle Unsymmetrien treten deutlicher hervor. Abschließend werden die Ergebnisse einiger typischen Messungen vorgestellt und analysiert.

1 Wozu Antennenuntersuchungen?

Die erwarteten und auch erreichbaren Anforderungen an die Genauigkeiten von GPS-Messungen steigen immer weiter an, während sich die Benutzer immer weniger Gedanken über die darin enthaltenen Fehlerkomponenten machen. Eine dieser Komponenten ist die Richtungsabhängigkeit des Phasenzentrums der GPS-Antennen.

In der Anfangszeit der Verwendung von GPS für die Vermessung war es selbstverständlich, daß die Antennen anhand einer Markierung nach Norden ausgerichtet wurden. Die zuerst eingesetzten Antennen waren Helix-Antennen, die besonders große Richtungsfehler aufwiesen. Da jedoch Antennen gleichen Typs innerhalb der Fertigungstoleranzen weitgehend das gleiche richtungsabhängige Fehlerbild haben, wird der richtungsabhängige Fehler bei gleicher Ausrichtung nach Norden bei der differentiellen Auswertung zum größten Teil eliminiert.

Die Helix-Antennen wurden bald von den Microstrip-Antennen abgelöst, deren Fehlerbeträge deutlich kleiner waren und die auch physikalisch kleiner und leichter waren. Trotzdem hatten die geodätischen Antennen weiterhin einen aufgedruckten Nordpfeil und teilweise sogar einen eingebauten Kompaß, um größtmögliche Genauigkeit zu erreichen. Für hochgenaue Meßkampagnen wurden oftmals alle Ausrüstungen zu gemeinsamen Vergleichsmessungen zusammengezogen. Das Ziel, durch diese Kalibrierungen die Genauigkeiten wesentlich zu steigern, wurde jedoch meistens nicht erreicht.

Da heute zunehmend kinematische und Stop&Go Verfahren mit sehr kurzen Aufstellzeiten angewendet werden, wobei die Ergebnisse oftmals gleich in Echtzeit ausgewertet werden, ist eine Ausrichtung der Antenne zu zeitraubend und nicht mehr üblich. Dabei werden meist spezielle kleinere und leichtere Antennen eingesetzt. An den Referenzstationen werden dagegen zur Vermeidung von Multipatheinflüssen Antennen mit großen Groundplanes oder Choke-Rings eingesetzt werden. Die Antennen sind daher nicht mehr gleichartig, wodurch sich auch die Ausrichtung zur Elimination der richtungsabhängigen Fehler erübrigt.

Wie groß ist aber nun letztendlich der richtungsabhängige Fehler des eingesetzten Systems, muß sich nun der Benutzer fragen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß zumindest in Bezug auf die Antennen das tatsächliche System aus der Differenz von Referenz- und Rover-Antenne besteht. Dabei kann es außerdem vorkommen, daß die Referenz-Antenne einem Referenzdienst gehört oder sonstwie unzugänglich ist und daher nicht manipuliert werden kann.

Es gibt daher Bedarf für eine einfache Systemuntersuchung vor Ort, die nachfolgend vorgestellt wird. Der Anlaß, mich mit diesem Thema zu befassen, war die Fertigstellung der ersten Prototypen eines neuen GPS-Systems. Die ersten Untersuchungen waren natürlich der Vergleich und die Kalibrierung der Prototypen gegenüber den bisherigen Systemen und untereinander. Da immer wieder Modifikationen an den Prototypen vorgenommen wurden, mußten diese Untersuchungen häufig wiederholt werden, wodurch der Gedanke an eine Rationalisierung der Methode geweckt wurde.

2 Die Untersuchungsmethode

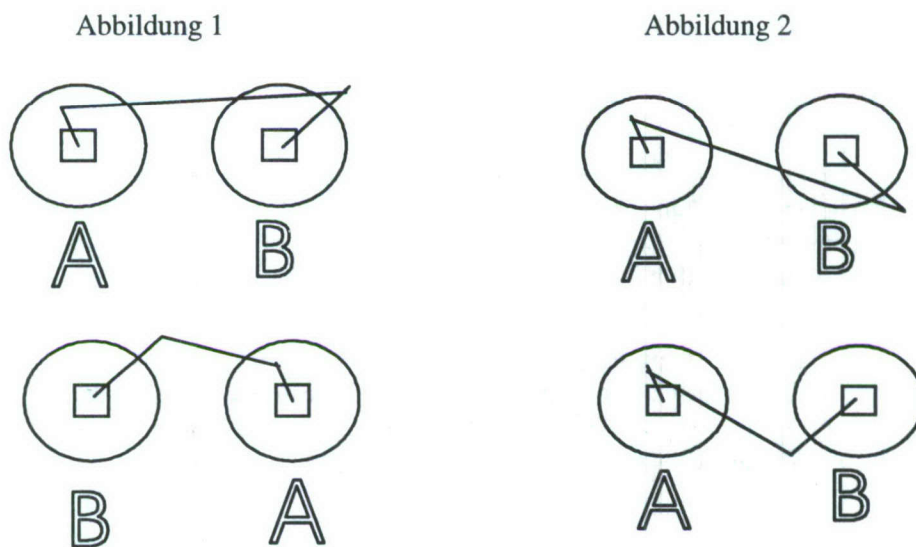
Der richtungsabhängige Antennenfehler ist im allgemeinsten Fall eine Funktion von Azimut und Elevation jedes empfangenen Signals in Bezug auf einen antennenfesten Bezugspunkt, normalerweise der Mittelpunkt des 5/8 Zoll Befestigungsgewindes, und eine markierte Bezugsrichtung. Diese Funktion kann nur mit großem Aufwand ermittelt werden kann, zB. nach WÜBBENA (1996), und muß dann bei der Basislinienberechnung an jede einzelne Beobachtung entsprechend angebracht werden. Dieser Aufwand steht aber nach bisherigen Erfahrungen in keinem angemessenen Verhältnis zu dem Genauigkeitsgewinn. Die vorgestellte Methode dient im Gegensatz dazu nur der Bestimmung des konstanten Anteils, der von dieser Funktion abgespalten werden kann, und dessen Variabilität bei unterschiedlichen Satellitenkonfigurationen.

Wenn man statt der einzelnen Messungen nur die resultierenden Ergebnisvektoren betrachtet, so beinhalten diese jeweils den konstanten Anteil, die Exzentrizität, und einen von der Satellitenkonstellation abhängigen variablen Anteil. Durch Wiederholungsmessungen einer bekannten

Basislinie zu unterschiedlichen Tageszeiten kann dann der konstante Anteil und die Variationsbreite des restlichen Fehlers ermittelt werden.

Für die Messungen richtet man sich am besten eine kurze Basislinie zwischen 1 bis 10 m ein und verwendet möglichst eine Zwangszentrierung. In der näheren Umgebung sollten sich keine reflektierenden Flächen befinden, da bei diesen kurzen Entfernungen die Reflexionseinflüsse (Multipath) letztendlich den relativ größten Einfluß haben.

Wenn die kurze Basislinie nicht bereits genauestens bekannt ist, kann diese Bestimmung durch einen Antennentausch zwischen den beiden Punkten erfolgen (Abbildung 1). Beim Antennentausch muß man darauf achten, daß beide Antennen immer gleich ausgerichtet werden, um die richtungsabhängigen Fehlereinflüsse zu eliminieren. Die Basislinien vor und nach dem Tausch enthalten die beiden Antennenfehler mit unterschiedlichen Vorzeichen. Daher ist das Mittel $((A-B)+(B-A))/2$ frei von beiden Antennenfehlern, während gleichzeitig die Differenz vor und nach dem Tausch $((A-B)-(B-A))$ die doppelte Differenz der beiden Antennenfehler enthält.



Der Antennentausch ist übrigens auch die beste Methode, um für verschiedenartige Antennen, die in einer gemeinsamen Messung gemischt eingesetzt werden sollen, die relativen Höhen der Phasenzentren über den Bezugspunkten zu bestimmen bzw. kontrollieren. Die Angaben zur Höhe des Phasenzentrums sind zwar konsistent zwischen den Produkten eines Herstellers, können aber durchaus einen konstanten Offset zu denen eines anderen Herstellers haben. Dies resultiert daraus, daß das Phasenzentrum nicht absolut, sondern immer nur relativ zu einer anderen Antenne bestimmt werden kann. Das Phasenzentrum befindet sich nämlich nicht zwangsläufig zentrisch innerhalb des physikalischen Volumens der Antenne, sondern befindet sich meist im freien Raum darüber.

Wenn man nun die zu untersuchende Antenne dreht, wie für die Antenne B in Abbildung 2 dargestellt, muß sich auch ein Fehler in der Zentrierung des Phasenzentrums der Antenne um den Drehpunkt bewegen. Andererseits dreht sich aus der Sicht der Antenne die Satellitenkonfiguration in entgegengesetzte Richtung, wodurch sich die richtungsabhängigen Antennenfehler ändern. Das Ergebnis ist also die Summe beider Fehlereffekte.

Durch 4 oder besser 8 Drehungen um jeweils 90 Grad erhält man genügend Stützpunkte für eine Auswertung, wie anschließend in den Beispielen dargestellt. Um die Untersuchung feiner aufzulösen, kann man natürlich auch um 6 mal 60, 8 mal 45 Grad oder, wenn man symmetrische Fehler vermutet, um 3 mal 120 oder 5 mal 72 Grad drehen. Wie bereits erwähnt, haben bei dieser Methode die Satellitengeometrie selbst und der davon abhängige Multipatheinfluß den größten Einfluß. Die Qualität der Ergebnisse ist daher unter diesem Aspekt um so besser, je schneller und kürzer der Antennentausch und die Antennendrehung hintereinander erfolgen.

Das schnellste geodätische Meßverfahren ist das Stop&Go Verfahren, bei dem die GPS-Empfänger auch während der Bewegung von Punkt zu Punkt kontinuierlich messen und in Kontakt mit den Satelliten bleiben. Mit dieser Methode können der Antennentausch und 8 Drehungen, also eine Messreihe, ohne weiteres innerhalb von 10 Messminuten durchgeführt werden. Innerhalb dieser Zeitspanne ist normalerweise auch bei Einfrequenzempfängern eine Mehrdeutigkeitslösung „on the fly“ möglich.

Bei ungefähr 12 Stunden Umlaufzeit der Satelliten liegen die Geometrieänderungen innerhalb von 10 Minuten, oder +/- 5 Minuten Abweichung vom Mittelwert, bei $(360_{\text{Grad}} * 5_{\text{Minuten}} / 12_{\text{Stunden}}) = +/- 3 \text{ Grad}$. Die Meßreihe bildet daher einen Schnappschuß der Auswirkungen der aktuellen Satellitenkonfiguration. Eine zweite Messreihe, etwa eine Stunde später, zeigt dann schon die Variabilität und den konstanten Anteil des Fehlers und somit die Größenordnung für die zu erwartenden antenneninduzierten Positionsfehler.

Bei jedem Wechsel der Antennenausrichtung wird jeweils eine neue Punktnummer vergeben, als wenn ein neuer Punkt mit der Stop&Go Methode aufgemessen würde. Das für die Beispiele verwendete Punktnummernschema ist in Tabelle 1 in der Spalte „Eingabe“ angegeben.

3 Ergebnisse in Beispielen

Nach der oben beschriebenen Methode wurden verschiedene Antennen untersucht. Die Messungen wurden auf einer sehr kurzen Basislinie von 1.5 Metern Länge mit fest montierter Zwangszentrierung durchgeführt. Die Basislinie war ungefähr in West-Ost Richtung ausgerichtet, weshalb der Westliche Punkt mit W und der östliche Punkt mit E bezeichnet wird. Die Bezugsantenne wird wie in den Abbildungen 1 und 2 mit A bezeichnet, und die zu untersuchende Antenne mit B.

Da die Auswertungen im Postprocessing erfolgten, wurden die Messungen jeweils ohne besondere Vorlaufzeiten unmittelbar begonnen. Je nachdem, ob das Interesse mehr auf der Nullpunkt-Bestimmung oder der Zentrierung der Antenne lag, wurde der Antennentausch oder auch die zweite Drehung ausgelassen. Der Ablauf der Messungen erfolgte immer nach dem gleichen Schema, das in Tabelle 1 dargestellt ist.

Tabelle 1: Ablaufplan und Bezeichnungen

Punkt W	Ausrichtung	Eingabe	Punkt E	Ausrichtung	Eingabe
Ant. B	N	100	Ant. A	N	0
Ant. A	N	100	Ant B	N	1
“	“	“	Ant B	E (90)	2
“	“	“	Ant B	S (180)	3
“	“	“	Ant B	W (270)	4
“	“	“	Ant B	N (360)	5
“	“	“	Ant B	E (90)	6
“	“	“	Ant B	S (180)	7
“	“	“	Ant B	W (270)	8
“	“	“	Ant B	N (360)	9

Die Untersuchungen können bei einer echtzeitfähigen GPS-Ausrüstung auch ohne Postprocessing durchgeführt werden. Im Gegensatz zu der oben dargestellten Vorgehensweise ist dann lediglich in der ersten Aufstellungskonfiguration, Antenne B auf Punkt E und Antenne A auf Punkt E, das Erreichen einer guten Mehrdeutigkeitslösung abzuwarten. Das Warmlaufen der Empfänger vor der eigentlichen Messung erhöht zudem sicherlich die Qualität der Ergebnisse, wenn dies auch von den Geräteherstellern nicht ausdrücklich empfohlen wird.

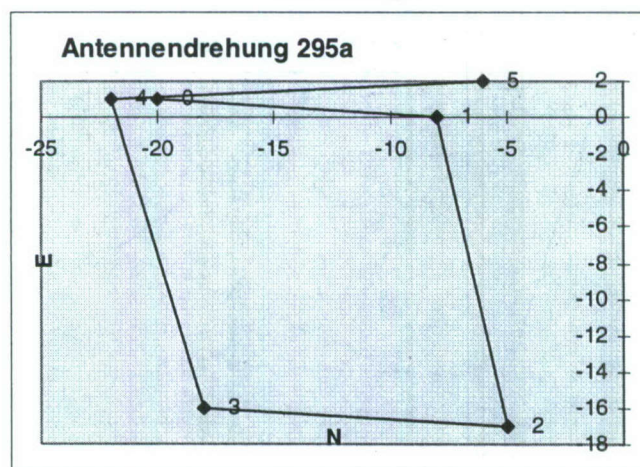
Bei der Untersuchung eines Systems mit Anschluß an eine unzugängliche Referenzstation, wie zB. der eines kommerziellen Anbieters von Korrekturdaten, muß man sich darauf verlassen, daß sich das mittlere Phasenzentrum auf die ausgewiesene Position bezieht. Während der Drehung der untersuchten Antenne ist wegen der geringen Geometrieänderungen während der Messung ein eventueller Einfluß eines richtungsabhängigen Fehlers der Referenzantenne konstant. Ohne Antennentausch kann man über die Koordinatenänderungen nur die Exzentrizität und die Charakteristik der jeweils untersuchten Antenne ermitteln. Wiederholt man diese Untersuchung jedoch bei unterschiedlichen Satellitenkonfigurationen, kann man aber aus den Änderungen auch Rückschlüsse auf die Referenzantenne bzw. die Unterschiede des richtungsabhängigen Fehlers zwischen beiden Antennen ziehen.

Die Auswertung erfolgt am besten grafisch durch vergrößertes Abtragen der Koordinatenunterschiede auf Papier oder durch Eingabe in eine Tabellenkalkulation mit grafischer Punktdarstellung. Durch Linienverbindungen in der Reihenfolge der Messung kann die Anschaulichkeit der Ergebnisse verbessert werden. Nachfolgend werden einige Auswertungen von Untersuchungen nach dieser Methode gezeigt. Die dargestellten Einheiten sind Millimeter.

Die Abbildung 3 zeigt sehr klar eine Exzentrizität der untersuchten Antenne. Die Linie beginnt links oben bei Punkt 0 mit der Position bei getauschten Antennen und geht nach rechts zu Punkt 1, der Ausgangsposition bei nordgerichteter Antenne. Der Mittelpunkt X dieser Linie stellt demnach die fehlerfreie Basislinie dar. Der Linienverlauf 1-2-3-4-5 bildet sehr klar erkennbar eine Rautenform, die einem Quadrat nahekommt. Die Linie verläuft im Uhrzeigersinn entsprechend der Drehrichtung der Antenne. Der Abstand der Punkte 1 und 5 zeigt die hohe Auflösung der Messung trotz der kurzen Messzeit mit einer Wiederholgenauigkeit von ca. 3 Millimetern.

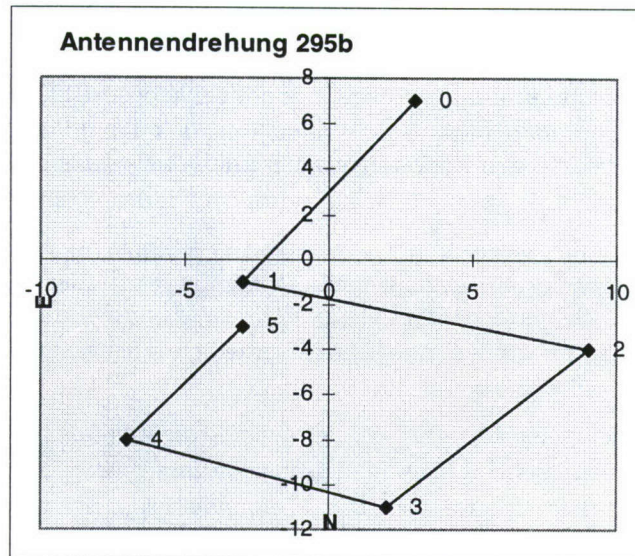
Aus der Grafik kann man relativ eindeutig auf eine Exzentrizität der Antenne schließen, deren Vektor bei Nordausrichtung vom Mittelpunkt der Figur zum Punkt 1 weist, bzw. exakter vom Mittelpunkt M eines ausgleichenden Kreises K durch die Punkte 1 2 3 4 5 zum Schnittpunkt der Geraden M-1 mit K weist. Der Vektor vom Kreismittelpunkt M zum Punkt X muß dann im übrigen nach den oben ausgeführten Überlegungen der Fehler der zweiten Antenne sein.

Abbildung 3



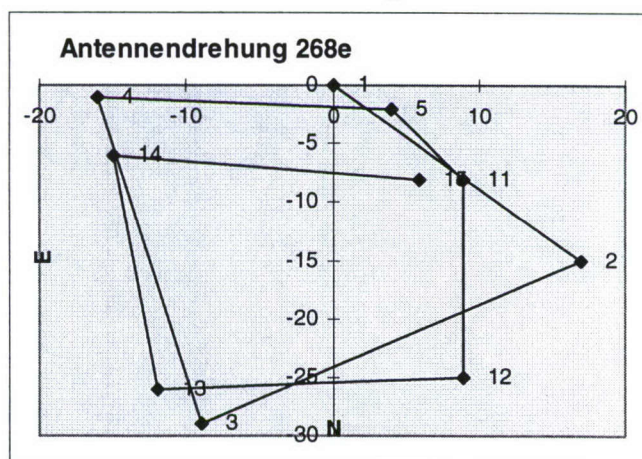
Die in Abbildung 4 gezeigte Untersuchung fand gleich im Anschluß an die vorhergehende mit einem anderen Prototypen statt. Die Grafik zeigt im Prinzip die gleiche Charakteristik, jedoch ist hier die Exzentrizität kleiner und in der Richtung etwas anders. Die Punkte 1 und 5 liegen noch näher zusammen, wodurch die Wiederholgenauigkeit bestätigt wird. Bei genauem Hinsehen fällt auf, daß der Vektor M-X die gleiche Richtung und Größe wie in Abbildung 3 hat, denn es wurde die gleiche Referenzantenne verwendet.

Abbildung 4



In Abbildung 5 ist die erste Antennenuntersuchung der Serie dargestellt, die zu der oben ausgeführten Methode geführt hat. Die ersten 5 Aufstellungen bzw. Ausrichtungen wurden nach dem „Rapid-Static“ Ansatz jeweils ca. 15 Minuten lang gemessen, und die folgenden 5 Aufstellungen, hier abweichend mit 11 bis 15 bezeichnet, jeweils nur 30 Sekunden lang nach der Stop&Go Methode. Die deutlich klarere Ausprägung des Quadrats der Linie 11-12-13-14-15 zeigt die Größenordnung der Verschmierreffekte durch die Konfigurationsänderungen während der Messung.

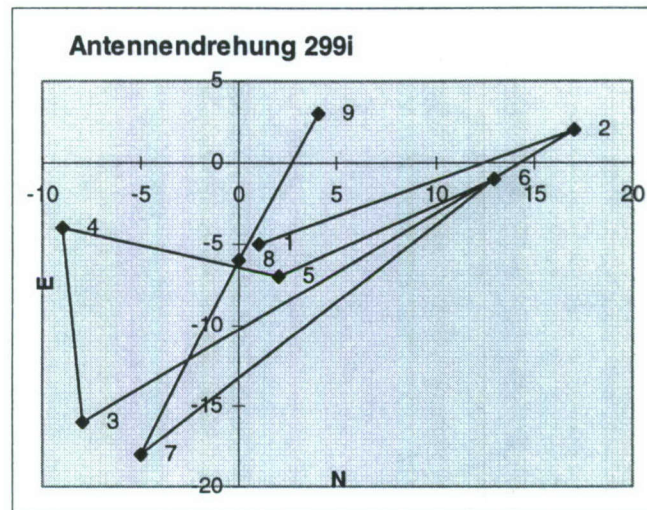
Abbildung 5



Nicht alle untersuchten Antennen zeigen jedoch solch klare Charakteristiken. In Abbildung 6 sind die Untersuchungsergebnisse einer Antenne eines anderen Typs dargestellt. Die Grafik zeigt ein ganz anderes, weniger klares Bild. Auch eine Wiederholungsmessung zeigte eine ähnliche Ausprägung. Die

Punktpaare 1 5, 2 6 und 3 7 liegen nahe beieinander und zeigen die Wiederholmessgenauigkeit. Die Punkte 8 9 fügen sich nicht in das Schema, was jedoch auf eine Konstellationsänderung oder andere Effekte zurückzuführen sein kann. Auch bei der Wiederholungsmessung zeigte sich jedoch die Form eines sehr flachen Trapezes mit diagonalaler Ausrichtung und einer Differenz zwischen Nord- und Süd-Ausrichtung von ca. 20 Millimetern. Bei dieser Antenne liegt vermutlich ein sehr stark unsymmetrisch ausgeprägter richtungsabhängiger Antennenfehler vor.

Abbildung 6



4 Resümee

Die dargestellte Methode zur Antennenuntersuchung ermöglicht es auch dem „normalen“ GPS-Anwender, sein System auf einfache Weise im Felde zu untersuchen. Dies ist vor allem dann anzuraten, wenn mit ausgeliehen Systemen gearbeitet wird und vor allem, wenn „gemischte“ Systeme verschiedener Hersteller eingesetzt werden. Die Untersuchung ist zwar dazu gedacht, die Antennen zu kalibrieren, die Auswertung vermittelt davon unabhängig aber auch ein Gefühl für den antennen-induzierten Fehler. Wenn man nachvollzieht, wie groß letztendlich der richtungsabhängige Antennenfehler im Verhältnis zum gesamten Fehlerbudget ist, wird man von Fall zu Fall gegebenenfalls doch wieder die Antennen nach Norden ausrichten, wie in den Anfängen der geodätischen GPS-Nutzung.

5 Literaturhinweise

WÜBBENA, G., et al. : *A new approach for field calibration of absolute Antenna Phase Center Variations*. Proceedings ION GPS-96

N.N. : *UNAVCO 1996 Annual Report, Chapter 4.1, Antenna Testing*.
www.unavco.ucar.edu/gen_info/FY_reports/FY_96/annual96-1.html

BAWDEN, G. : *UC Davis Phase Center Test, Jan.28-Feb.3 1997*.
www.geology.ucdavis.edu/~bawden/phasescenter.html

MADER, G. L. : *Antenna calibration summary*.
www.grdl.noaa.gov/GRD/GPS/Projects/ANTCAL/Files/summary.html

DAS KINEMATISCHE VERMESSUNGSSYSTEM KiSS: ZENTRIERUNG DER SENSORDATEN UND TRANSFORMATION IN DAS FAHRZEUGSYSTEM

Dipl.-Ing. Gunnar Gräfe
Dipl.-Ing. Jochen Klemm
Dipl.-Ing. Harald Sternberg

Institut für Geodäsie
Universität der Bundeswehr München
85577 Neubiberg

Zusammenfassung

Das kinematische Vermessungssystem KiSS (Kinematic Survey System) ist ein hybrides Meßsystem zur Bestimmung der Trajektorie des Meßfahrzeuges und zur photogrammetrischen Aufnahme der Fahrbahn und fahrbahnnaher Objekte. Das System verwendet eine Reihe unterschiedlicher Sensoren. Die Meßdaten des GPS-Empfängers, des inertialen Navigationssystems, des Wegsensors, des Barometers und der CCD-Kameras werden zusammen verarbeitet und müssen auf einen gemeinsamen Punkt bezogen werden. Zu diesem Zweck sind zunächst rein geometrische Größen zu ermitteln, wie die Lage der Sensoren zueinander und die Ausrichtung der jeweiligen Sensorachsen. Diese Parameter dienen zur Transformation der Sensordaten in das Fahrzeugsystem. Zusätzlich sind aber auch physikalische Einflüsse zu berücksichtigen, insbesondere die auftretenden Winkelgeschwindigkeiten. Die Sensordaten durchlaufen neben dem Bezug auf das Fahrzeugsystem noch einige weitere Vorverarbeitungsschritte. Dabei werden alle gemessenen Größen in das Gauß-Krüger-Landeskoordinaten-system mit Höhen transformiert. Das Ergebnis der Transformationen sind z.B. Positionen und Geschwindigkeiten aus GPS-Messungen bezogen auf den Fahrzeugnullpunkt als Eingangsgrößen für ein zentrales Kalman-Filter. Nach der Berechnung der Trajektorie lassen sich aus den Bildkoordinaten für jeden Objektpunkt Landeskoordinaten bestimmen.

1 Das kinematische Vermessungssystem KiSS

Das kinematische Vermessungssystem KiSS ist ein hybrides Meßsystem zur Ermittlung der Trajektorie des Meßfahrzeuges und zur photogrammetrischen Aufnahme der Fahrbahn und fahrbahnnaher Objekte. Die Trajektorie läßt sich mit satellitengestützten Methoden (DGPS) und einem inertialen Navigationssystem (INS) in Verbindung mit weiteren Sensoren bestimmen. Die Objekte entlang der Straße werden mit zwei CCD-Kameras und einer Farbvideokamera aufgezeichnet. Aus den digitalen Bildern der CCD-Kameras lassen sich Punktkoordinaten für die aufgenommenen Objekte photogrammetrisch ermitteln. Die Auswertung findet nach erfolgter Meßfahrt statt.

Im einzelnen werden zur Trajektorienbestimmung derzeit die Meßdaten folgender Sensoren verwendet:

- (1) Inertiales Navigationssystem LLN 83
- (2) Wegsensor
- (3) Barometer
- (4) 2 GPS-Empfänger (ein Empfänger auf dem Fahrzeug, eine Referenzstation)

Hinzu kommen für die photogrammetrische Auswertung:

- (5) 2 CCD - Kameras

Die Farbvideokamera dient zur anschaulichen Dokumentation der aufgenommenen Strecke.

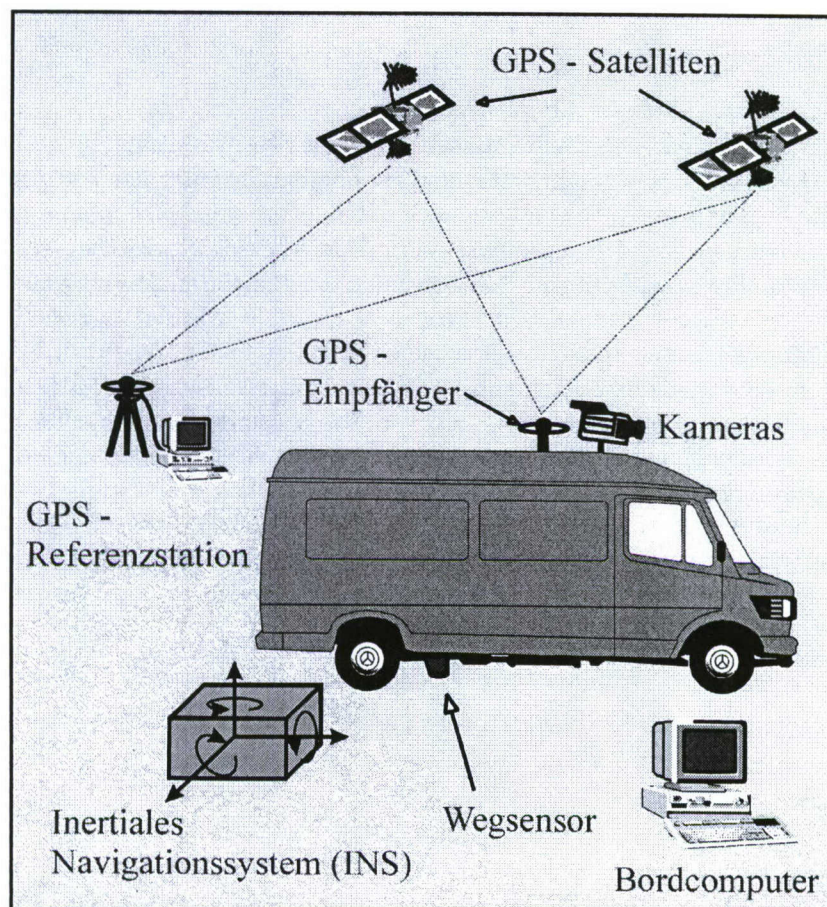


Abbildung 1 : Skizze des Systems

2 Ablauf der Auswertung

2.1 Allgemeines

Zur Bestimmung der Trajektorie des Fahrzeuges werden die Daten von vier unterschiedlichen Sensoren aufgezeichnet. Damit die Sensordaten gemeinsam verarbeitet werden können, sind für jeden einzelnen Sensor drei Vorverarbeitungsschritte erforderlich.

Der erste Rechenschritt besteht in einer sensorspezifischen Datenvorverarbeitung, wie z.B. der Beseitigung bekannter Sensorfehler. Der zweite Rechenschritt umfaßt die Transformation der Beobachtungen in das Fahrzeugkoordinatensystem und in das Landeskoordinatensystem. Der gemeinsame Bezugsrahmen für alle Sensoren und deren Beobachtungen wird durch das Fahrzeugkoordinatensystem mit dem Fahrzeugnullpunkt als Zentrum und den Fahrzeugachsen als Richtungen definiert (Abb. 3). Der dritte und letzte Rechenschritt ist die Glättung der gewonnenen Daten.

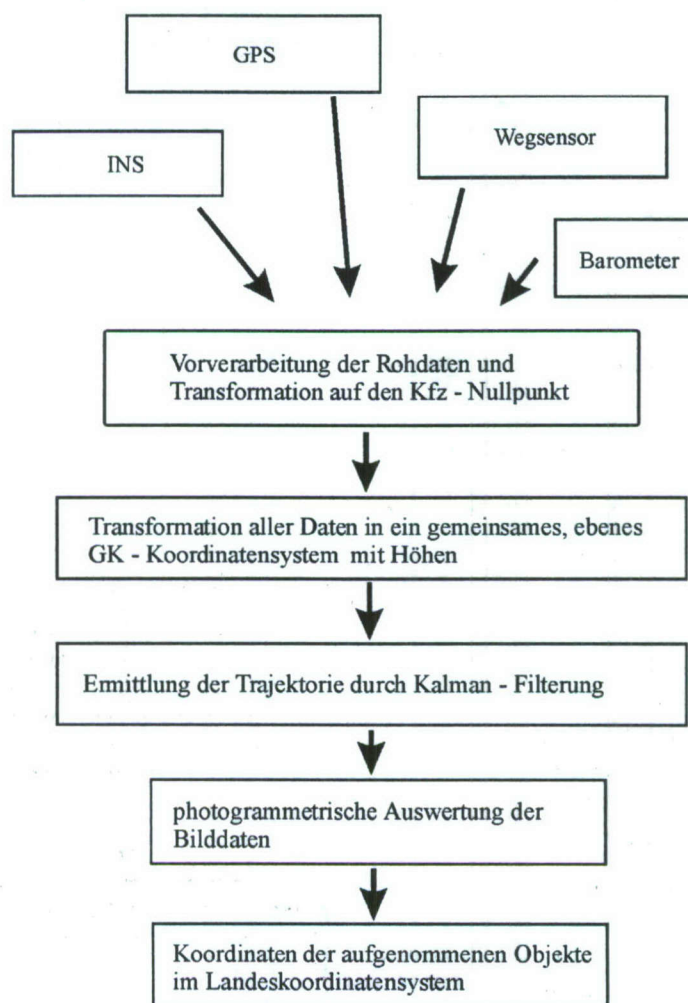


Abbildung 2 : Ablauf der Auswertung

Die Berechnung der ausgeglichenen Positionen und Lagewinkel für das Fahrzeug erfolgt mit Hilfe eines zentralen Kalman-Filters. Die Auswertung findet dreidimensional im Gauß-Krüger-Landeskoordinatensystem mit Höhen statt. Die Trajektorie des Fahrzeuges dient wiederum als Grundlage für die photogrammetrische Auswertung der Bilddaten. Wenn Position und Lagewinkel und damit die äußere

Orientierung zu jedem Aufnahmezeitpunkt bekannt sind, können für die aufzunehmenden Objekte mittels eines räumlichen Vorwärtsschnittes Landeskoordinaten ermittelt werden.

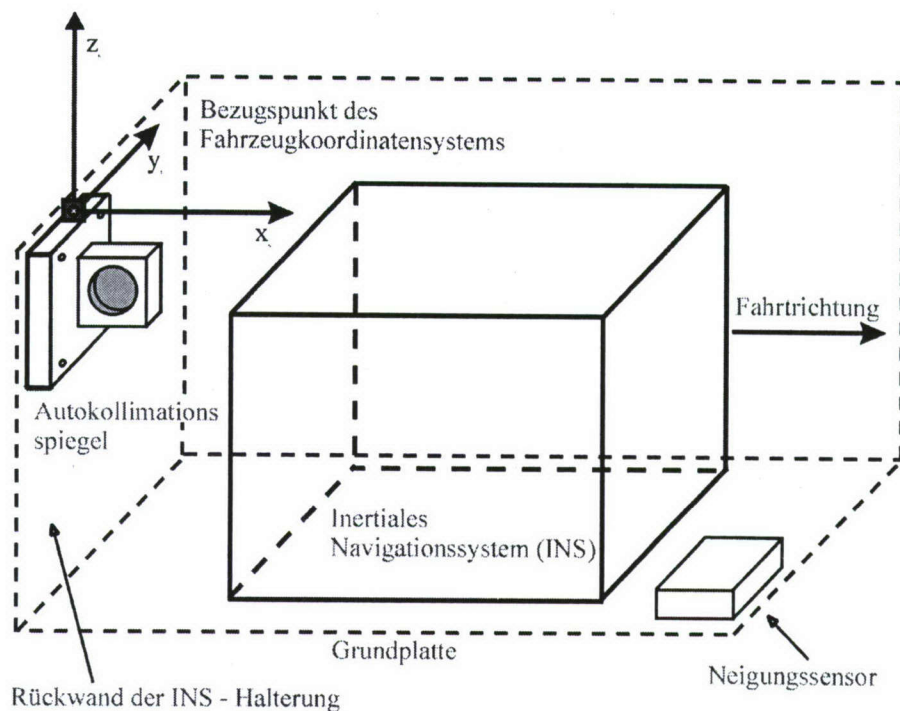


Abbildung 3 : Festlegung des Fahrzeugkoordinatensystems

2.2 Vorverarbeitung der Sensordaten

2.2.1 Inertiales Navigationssystem (LLN 83)

Das inertielle Navigationssystem LLN 83 besteht aus zwei zweiachsigen, trocken abgestimmten mechanischen Kreislern und drei Beschleunigungsmessern. Die Meßdaten werden intern verarbeitet und Positionen und Lagewinkel ausgegeben. Die Positionen werden derzeit nicht weiter verwendet.

Die aufgezeichneten Lagewinkel sind durch Sensorfehler verfälscht. In der Vorverarbeitung findet eine Korrektur um Skalenfaktor, Offset und Kreuzkopplung statt. Die korrigierten Lagewinkel beschreiben die Lage des Fahrzeugkoordinatensystems gegenüber dem topozentrischen Koordinatensystem. Außer der Umwandlung des Azimutes in einen GK-Richtungswinkel ist keine weitere Transformation erforderlich.

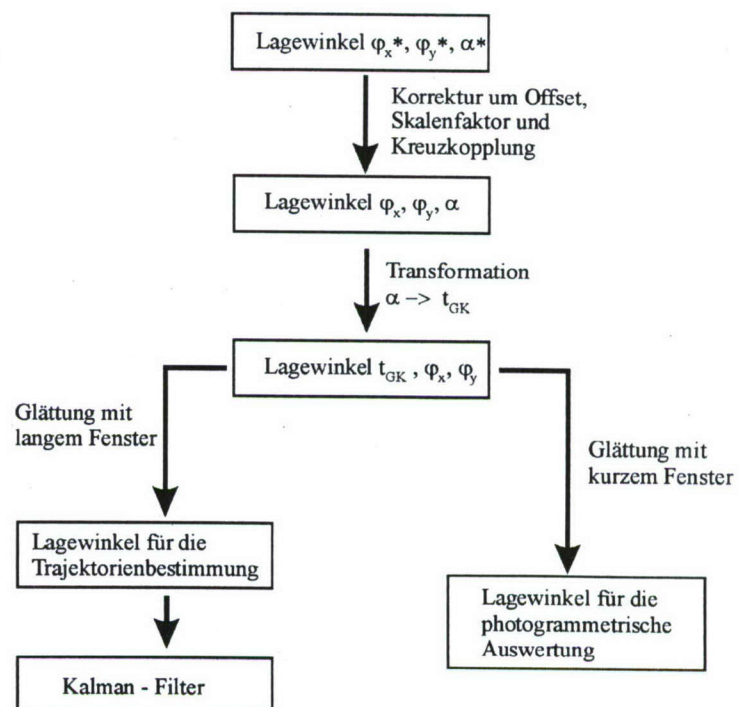


Abbildung 4 : Vorverarbeitung der Lagewinkel

Bevor die Lagewinkel verarbeitet werden können, müssen diese allerdings noch geglättet werden. Neben starkem Meßrauschen enthalten die Winkel auch Anteile hochfrequenter Fahrzeugschwingungen.

Bei der Glättung sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- I. Für die photogrammetrische Auswertung werden reale Lagewinkel benötigt. Dies bedeutet, daß die Schwingungsanteile erhalten bleiben müssen. Es wird mit einem kurzen Fenster geglättet.
- II. Für die Bestimmung der Trajektorie hingegen sollen die Lagewinkel die Bewegung des Fahrzeuges im Raum beschreiben. Die Schwingungen stellen in diesem Fall ein Störsignal dar und werden durch ein langes Glättungsfenster eliminiert.

2.2.2 Wegsensor

Die aufgezeichneten Rohdaten des Wegsensors sind zunächst nur Weginkremente, die im ersten Schritt der Vorverarbeitung in Geschwindigkeiten umgewandelt werden. Diese beziehen sich auf den spezifischen Meßpunkt des Wegsensors und müssen daher auf den Bezugspunkt des Fahrzeugsystems transformiert werden (siehe Abschnitt 3.1).

Die Beobachtungen enthalten außerdem ein starkes Rauschen, das durch die Transformation noch vergrößert wird. Vor Einführung der Geschwindigkeiten in das Kalman-Filter ist aus diesem Grund auch hier eine Glättung erforderlich.

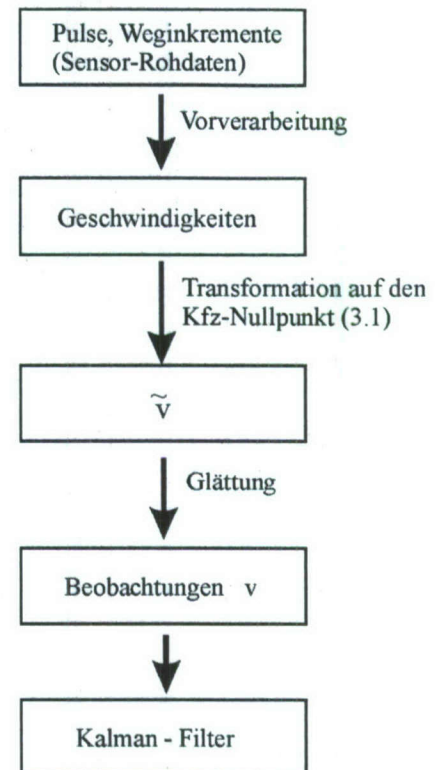


Abbildung 5 : Vorverarbeitung der Wegsensor - Daten

2.2.3 Barometer

Zur Stützung der Höhenbestimmung wird ein digitales Barometer eingesetzt. Verlässliche Höhenunterschiede lassen sich jedoch nur bestimmen, wenn zwei wesentliche Vorverarbeitungsschritte durchlaufen werden.

Der erste Schritt besteht in der Umwandlung der aufgezeichneten Luftdruck- in Höhenänderungen mit Hilfe eines atmosphärischen Modells. Weiterhin ist zu beachten, daß die Messungen im Inneren eines bewegten Fahrzeuges stattfinden. Die Geschwindigkeit des Fahrzeuges und Beschleunigungsvorgänge haben Staudruck und andere Störeffekte zur Folge. Diese werden im zweiten Schritt der Vorverarbeitung über ein Luftwiderstandsmodell berücksichtigt.

Die Höhe des Fahrzeugnullpunktes bei Beginn der Meßfahrt ist bekannt. Mit Hilfe dieser Information lassen sich die gewonnenen Höhenänderungen direkt in Höhen umwandeln. Aufgrund des Meßrauschens ist auch für die barometrisch bestimmten Höhen eine Glättung erforderlich.

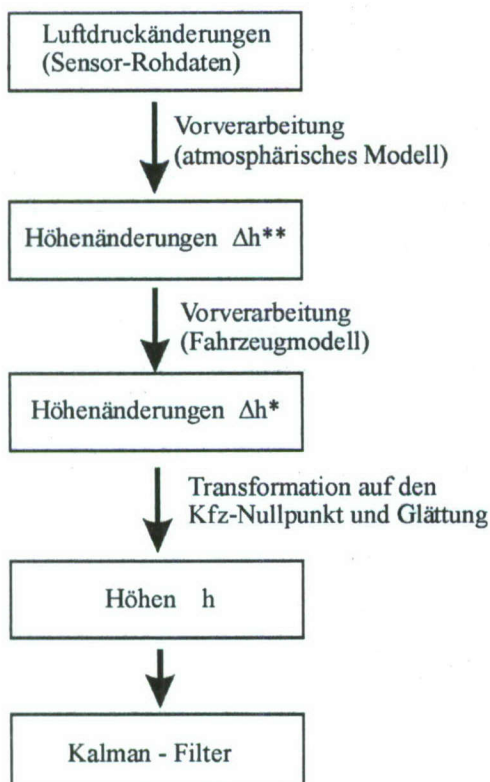


Abbildung 6 : Vorverarbeitung der Barometer-Daten

2.2.4 GPS

Die von der GPS-Fahrzeugantenne und der Referenzstation aufgezeichneten Rohdaten werden mit Hilfe eines GPS-Filters ausgewertet, siehe CHEN (1998).

Das Ergebnis dieser Vorverarbeitung sind Position und Geschwindigkeit der GPS-Antenne zum jeweiligen Meßzeitpunkt. Damit die Daten im zentralen Kalman-Filter verarbeitet werden können, müssen diese zunächst auf den Fahrzeugnullpunkt umgeformt und anschließend auf das Gauß-Krüger-Landeskoordinatensystem mit ellipsoidischen Höhen transformiert werden.

Dies schließt einen Ellipsoidübergang vom WGS-84 auf das Bessel-Ellipsoid ein. Im einzelnen werden die Transformationen im Abschnitt 3.2 erläutert.

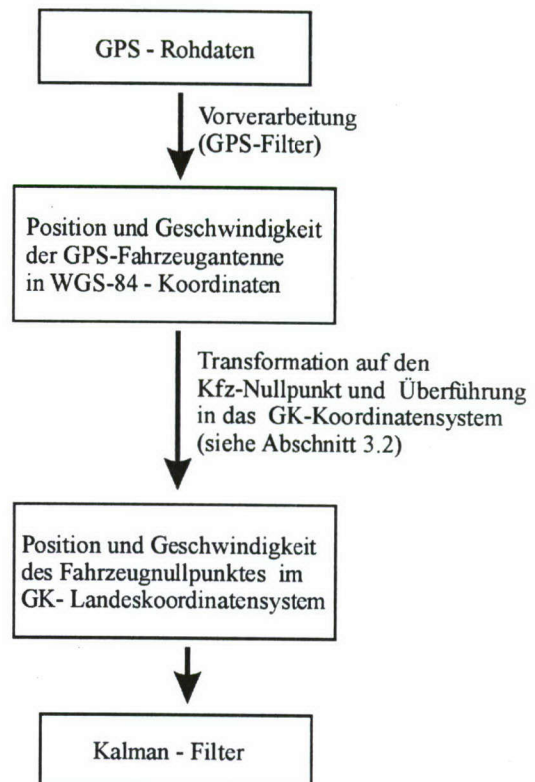


Abbildung 7 : Vorverarbeitung GPS

3 Transformationen

Aus den vorangegangenen Erläuterungen ergibt sich, daß im Zuge der Vorverarbeitung der Sensordaten zwei Transformationen notwendig sind. Diese werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert. Es handelt sich um:

- (a) die Transformation der Geschwindigkeit des Wegsensors und
- (b) die Transformation der GPS-Positionen und Geschwindigkeiten.

3.1 Transformation der Geschwindigkeit des Wegsensors

Die beobachtete Geschwindigkeit, d.h. die Geschwindigkeit in Fahrtrichtung, bezieht sich auf den Meßpunkt des Wegsensors. Für die Trajektorienbestimmung wird aber die Geschwindigkeit des Fahrzeugnullpunktes benötigt. Folgende allgemeine Überlegungen sind maßgeblich für die Lösung des Problems:

Solange eine geradlinige Bewegung vorliegt, ist die Geschwindigkeit für alle Punkte des Fahrzeuges gleich. Beschreibt das Fahrzeug jedoch eine Kurve, so ist nur die Winkelgeschwindigkeit für alle Punkte gleich, die Absolutgeschwindigkeit jedoch unterschiedlich. Der gemessene Geschwindigkeitsvektor muß daher unter Berücksichtigung der Winkelgeschwindigkeit auf den Nullpunkt des Fahrzeugsystems transformiert werden. Im Verlauf einer Meßfahrt nimmt in der Regel nur die Winkelgeschwindigkeit um die z-Achse, d.h. die Azimutänderung, signifikante Werte an.

Die erforderliche Korrektur der Geschwindigkeit ergibt sich nach der Formel :

$$\Delta \mathbf{v}^f = \boldsymbol{\omega}^f \times \Delta \mathbf{x}^f = \begin{pmatrix} \omega_y \Delta z - \omega_z \Delta y \\ \omega_z \Delta x - \omega_x \Delta z \\ \omega_x \Delta y - \omega_y \Delta x \end{pmatrix}, \text{ mit } \boldsymbol{\omega}^f = \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \text{ und } \Delta \mathbf{x}^f = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (1)$$

als Vektoren der Winkelgeschwindigkeiten, bzw. der Koordinaten des Wegsensors im Fahrzeugkoordinatensystem. Die Fahrzeugkoordinaten des Wegsensors werden durch eine terrestrische Aufnahme ermittelt (Kap. 4).

Für die Transformation der Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_i auf den Fahrzeugnullpunkt gilt damit :

$$\mathbf{v}^f(t_i) = \mathbf{v}^f(t_i) - \Delta \mathbf{v}^f(t_i), \text{ mit } \mathbf{v}^f(t_i) \quad (2)$$

als Vektor der gemessenen Geschwindigkeiten.

Der Wegsensor mißt die Geschwindigkeitskomponente v_x , d.h. die Geschwindigkeit in Fahrtrichtung. Die übrigen Komponenten haben im Fahrzeugsystem den Wert Null. Die Genauigkeit der gemessenen Geschwindigkeit wird anhand einer Gebrauchsformel des Herstellers ermittelt.

3.2 Transformation der GPS-Positionen und Geschwindigkeiten

Das Ergebnis des GPS-Kalman-Filters sind dreidimensionale Positionen und Geschwindigkeiten für die GPS-Fahrzeugantenne im WGS-84-Koordinatensystem. Für die Berechnung der Trajektorie müssen diese in das Gauß-Krüger-System transformiert und auf den Fahrzeugnullpunkt bezogen werden.

3.2.1 Transformation der geozentrischen GPS-Koordinaten und Geschwindigkeiten auf den Fahrzeugnullpunkt

a.) Transformation der Koordinaten:

Das Ergebnis der DGPS-Positionsbestimmung sind geozentrische Koordinaten für die GPS - Antenne zu jedem Meßzeitpunkt t_i . Die Transformation auf den Ursprung des Fahrzeugsystems erfolgt durch eine Korrektur der Position :

$$\mathbf{x}_0^g(t_i) = \mathbf{x}_A^g(t_i) - \mathbf{R}_t^g(t_i) \mathbf{R}_f^t(t_i) \Delta \mathbf{x}_A^f \quad (3)$$

mit : $\mathbf{x}_0^g(t_i)$ = geozentrische Koordinaten des Fahrzeugnullpunktes zum Zeitpunkt t_i bezogen auf das WGS-84-Ellipsoid

$\mathbf{x}_A^g(t_i)$ = geozentrische Koordinaten der GPS-Antenne bezogen auf das WGS-84-Ellipsoid

$\Delta \mathbf{x}_A^f$ = Koordinaten der GPS-Antenne im Fahrzeugsystem. Diese werden durch eine terrestrische Aufnahme ermittelt (Kap. 4).

$\mathbf{R}_f^t(t_i)$ = Rotationsmatrix vom Fahrzeugsystem ins topozentrische System

$\mathbf{R}_t^g(t_i)$ = Rotationsmatrix vom topozentrischen ins geozentrische Koordinatensystem

Indizes :

f	=	Fahrzeugkoordinatensystem
t	=	topozentrisches Koordinatensystem
g	=	geozentrisches Koordinatensystem
A	=	Bezugspunkt ist die GPS-Antenne.
0	=	Bezugspunkt ist der Fahrzeugnullpunkt.

Die Rotationswinkel vom Fahrzeugsystem ins topozentrische System sind die geglätteten Lagewinkel des Fahrzeuges. Die Rotationsmatrix lautet, GRÄFE (1996):

$$\mathbf{R}_f^t = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \varphi_y & \cos \varphi_x \sin \alpha + \sin \varphi_y \sin \varphi_x \cos \alpha & -\sin \varphi_x \sin \alpha + \sin \varphi_y \cos \varphi_x \cos \alpha \\ \cos \varphi_y \sin \alpha & -\cos \varphi_x \cos \alpha + \sin \alpha \sin \varphi_y \sin \varphi_x & \cos \alpha \sin \varphi_x + \sin \varphi_y \cos \varphi_x \sin \alpha \\ -\sin \varphi_y & \cos \varphi_y \sin \varphi_x & \cos \varphi_y \cos \varphi_x \end{pmatrix} \quad (4)$$

mit : α = Azimut
 φ_x = Drehwinkel um die x-Achse des Fahrzeuges
 φ_y = Drehwinkel um die y-Achse des Fahrzeuges

Es muß an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß die Matrix R_t^t speziell an die Drehrichtungen der Winkel im System KiSS angepaßt wurde und daher nicht mit der allgemeinen, kardanischen Rotationsmatrix identisch ist.

Für die Rotationsmatrix R_t^g in das geozentrische Koordinatensystem gilt :

$$R_t^g = \begin{pmatrix} -\cos \lambda \sin \varphi & -\sin \lambda & \cos \lambda \cos \varphi \\ -\sin \lambda \sin \varphi & \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda \\ \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (5)$$

mit : φ, λ = geographische Breite und Länge

Die Transformation beeinflußt auch die Genauigkeit der Koordinaten. Für die Varianz-Kovarianz-Matrix (VKM) nach der Transformation gilt :

$$D_{xx,0}^g = D_{xx,A}^g + R_t^g R_f^t D_{\Delta x \Delta x}^f (R_t^g R_f^t)^T \quad (6)$$

mit : $D_{\Delta x \Delta x}^f$ = VKM der Fahrzeugkoordinaten der GPS-Antenne Δx_A^f
 $D_{xx,A}^g$ = VKM der Koordinaten in Bezug auf die GPS-Antenne
 $D_{xx,0}^g$ = VKM der Koordinaten nach der Korrektur in Bezug auf den Fahrzeugnullpunkt

Die Standardabweichung der Fahrzeugkoordinaten der Antenne liegt unter 5 mm. In der Regel bleibt daher der Einfluß der Matrix $D_{\Delta x \Delta x}^g$ auf die Genauigkeit der Koordinaten vernachlässigbar klein.

b.) Transformation der Geschwindigkeiten:

Der Geschwindigkeitsvektor muß ebenfalls für jeden Meßzeitpunkt t_i auf den Ursprung des Fahrzeugsystems bezogen werden. Für die entsprechende Korrektur gelten die gleichen Überlegungen, die bereits im Kapitel 3.1 für den Wegsensor angestellt wurden:

$$v_0^g(t_i) = v_A^g(t_i) - R_t^g(t_i) R_f^t(t_i) \Delta v_A^f(t_i) \quad (7)$$

mit : $v_0^g(t_i)$ = Geschwindigkeit des Fahrzeugnullpunktes zu einem Zeitpunkt t_i im geozentrischen WGS-84 Koordinatensystem
 $v_A^g(t_i)$ = Geschwindigkeit der GPS-Antenne im geozentrischen WGS-84 Koordinatensystem

Für die Korrektur gilt (1) : $\Delta v_A^f(t_i) = \omega^f(t_i) \times \Delta x_A^f$

mit: $\omega^f(t_i)$ = Vektor der Winkelgeschwindigkeiten in Bezug auf die drei Achsen des Fahrzeugsystems zum Zeitpunkt t_i und
 Δx_A^f = Koordinaten der GPS-Antenne im Fahrzeugsystem .

Der Genauigkeitsverlust durch die Transformation ist vernachlässigbar klein.

3.2.2 Übergang vom WGS-84 auf das Bessel – Ellipsoid

Die GPS-Koordinaten und Geschwindigkeiten für das Meßfahrzeug werden im zweiten Transformationsschritt vom WGS-84-Ellipsoid auf das Bessel-Ellipsoid transformiert. Der Übergang erfolgt mit einer 7-Parameter-Transformation:

$$\mathbf{x}_B^g = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} + m \mathbf{R}_W^B \mathbf{x}_W^g \quad \text{mit:} \quad \mathbf{R}_W^B = \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{pmatrix} \text{ Rotationsmatrix} \quad (8)$$

m = Maßstab
 $\Delta \mathbf{x}$ = Translation

B = Bessel-Ellipsoid
 W = WGS-84-Ellipsoid

Für den Geschwindigkeitsvektor gilt:

$$\mathbf{v}_B^g = m \mathbf{R}_W^B \mathbf{v}_W^g \quad (9)$$

3.2.3 Transformation der geozentrischen Koordinaten und Geschwindigkeiten in geographische Koordinaten

Das Ergebnis der ersten beiden Transformationsschritte sind geozentrische Positionen und Geschwindigkeiten in Bezug auf das Bessel - Ellipsoid. Der Übergang von geozentrischen auf geographische Koordinaten läßt sich mit Hilfe der bekannten Gleichungen durchführen. Durch Linearisierung ergibt sich die Jacobi - Matrix \mathbf{J}_g^e , mit der die Transformation der Geschwindigkeiten erfolgt:

$$\mathbf{v}^e = \mathbf{J}_g^e \mathbf{v}^g \quad \text{mit:} \quad \mathbf{v}^e = \text{Geschwindigkeit in geographischen Koordinaten} \quad (10)$$

$\mathbf{v}^g = \text{Geschwindigkeit in geozentrischen Koordinaten}$

$$\mathbf{J}_g^e = \begin{pmatrix} -\frac{1}{M+h} \sin \varphi \cos \lambda & -\frac{1}{M+h} \sin \varphi \sin \lambda & \frac{1}{M+h} \cos \varphi \\ -\frac{1}{(N+h) \cos \varphi} \sin \lambda & \frac{1}{(N+h) \cos \varphi} \cos \lambda & 0 \\ \cos \varphi \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda & \sin \varphi \end{pmatrix} \text{ Jacobi-Matrix}$$

φ, λ, h = geographische Koordinaten
 M = Meridiankrümmungshalbmesser
 N = Querkrümmungshalbmesser

Die VKM der Koordinaten läßt sich ebenfalls mit der Jacobi - Matrix \mathbf{J}_g^e übertragen:

$$\mathbf{D}_{xx}^e = \mathbf{J}_g^e \mathbf{D}_{xx}^g (\mathbf{J}_g^e)^T \quad (11)$$

mit: \mathbf{D}_{xx}^e = VKM in geographischen Koordinaten
 \mathbf{D}_{xx}^g = VKM in geozentrischen Koordinaten

(11) gilt entsprechend auch für die Geschwindigkeiten.

3.2.4 Transformation der geographischen Koordinaten und Geschwindigkeiten in das Gauß-Krüger-Landeskoordinatensystem

Der Übergang von ellipsoidischen Koordinaten auf das Gauß-Krüger-Landessystem läßt sich mit Hilfe der bekannten Abbildungsgleichungen durchführen, SCHÖDLBAUER (1982). Durch Linearisierung der Gleichungen ergibt sich die Jacobi-Matrix J_e^{GK} , mit der die Transformation der Geschwindigkeiten erfolgt:

$$v^{GK} = J_e^{GK} v^e \quad \text{mit :} \quad v^{GK} = \text{Geschwindigkeit in Gauß-Krüger-Koordinaten} \quad (12)$$

$$v^e = \text{Geschwindigkeit in geographischen Koordinaten}$$

$$J_e^{GK} = \begin{pmatrix} \frac{N}{V^2} & 0 & 0 \\ 0 & N \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Jacobi - Matrix}$$

Die VKM der Koordinaten läßt sich ebenfalls mit der Jacobi - Matrix J_e^{GK} übertragen:

$$D_{xx}^{GK} = J_e^{GK} D_{xx}^e (J_e^{GK})^T \quad (13)$$

$$\text{mit :} \quad D_{xx}^{GK} = \text{VKM in Gauß-Krüger-Koordinaten}$$

$$D_{xx}^e = \text{VKM in geographischen Koordinaten}$$

Entsprechend gilt (13) auch für die Geschwindigkeiten.

Das Ergebnis der Transformationen sind Koordinaten und Geschwindigkeiten im Gauß-Krüger-Koordinatensystem mit Höhen. Diese gehen als Beobachtungen in die Trajektorienbestimmung ein.

4 Ermittlung der Fahrzeugkoordinaten der Sensoren

Für die Zentrierung der Sensordaten des Wegsensors und des GPS-Empfängers wird die genaue Lage der zwei Sensoren im Fahrzeug benötigt. Die Ermittlung der Fahrzeugkoordinaten erfolgt im Zuge der terrestrischen Aufnahme des Systems KiSS. Diese hat zwei Ziele :

- 1) Bestimmung der Orientierungsparameter für die beiden CCD-Kameras
- 2) Bestimmung der Fahrzeugkoordinaten der Sensoren

Für die Bestimmung der Orientierungsparameter der beiden CCD-Kameras wurde ein Testfeld mit 105 Meßmarken angelegt.

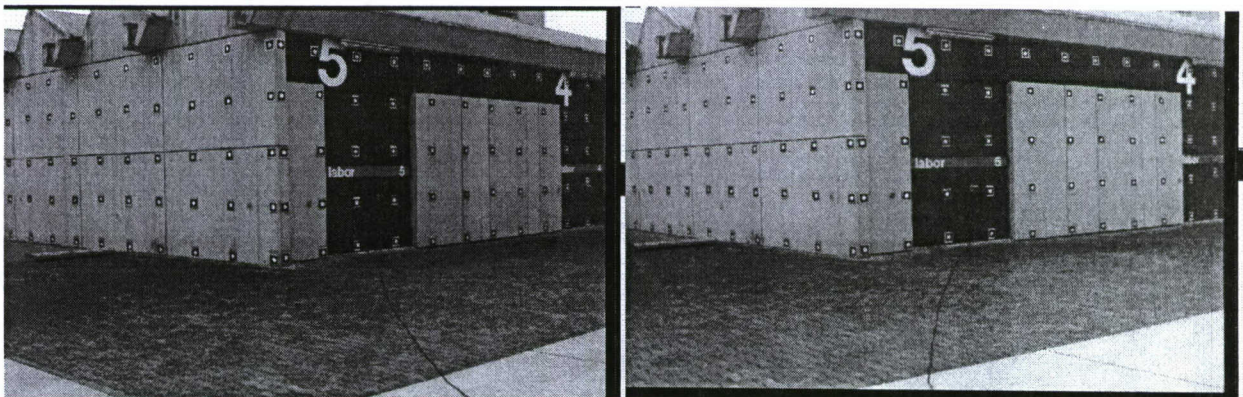


Abbildung 8 : Das Testfeld aus der Perspektive der beiden CCD-Kameras

Das Testfeld wird von verschiedenen Positionen aus mit den Kameras aufgenommen. Mit Hilfe der bekannten Koordinaten der Meßmarken lassen sich durch eine Bündelblockausgleichung die Orientierungsparameter der Kameras ermitteln.

Um die Orientierung der Kameras im Fahrzeugkoordinatensystem bestimmen zu können, muß der Bezug zwischen Testfeld und Fahrzeug hergestellt werden. Dies geschieht terrestrisch. Eine eindeutige Beziehung zwischen den beiden Koordinatensystemen ist realisiert, wenn die Position des Fahrzeugnullpunktes und die drei Lagewinkel des Fahrzeuges im Testfeldkoordinatensystem bekannt sind. Die Koordinaten des Fahrzeugnullpunktes werden durch Theodolitmessungen bestimmt. Die Erfassung der beiden Neigungswinkel des Fahrzeuges erfolgt durch Neigungssensoren. Der Richtungswinkel der Fahrzeugachse im Testfeld wird durch Autokollimation festgestellt.

Im Zuge dieser Messungen werden auch die Sensoren, d.h. GPS-Antenne und Wegsensor, aufgenommen und deren Koordinaten im Testfeldkoordinatensystem bestimmt. Mit Hilfe der Koordinaten des Fahrzeugnullpunktes und der drei Lagewinkel lassen sich die Testfeldkoordinaten in das Fahrzeugsystem transformieren. Das Ergebnis sind die Fahrzeugkoordinaten für den Wegsensor und die GPS-Antenne.

5 Erfahrungen und Ausblick

Die beschriebene Vorgehensweise hat sich in der Praxis bewährt. Dies gilt sowohl für die Vorverarbeitung der Meßdaten als auch für das Verfahren zur Bestimmung der Sensorkoordinaten. Die Koordinaten der GPS-Antenne und des Wegsensors lassen sich mit einer Standardabweichung von < 5 mm bestimmen. Dies hat sich in mehreren Wiederholungen bestätigt. Ebenso hat sich gezeigt, daß die Zentrierelemente in Bezug auf die Lage im Rahmen der Genauigkeit stabil sind. Aufgrund dieser Stabilität muß die Einmessung der Sensoren nur bei einer Änderung der Sensoranordnung wiederholt werden. Als Nachteil ist lediglich der Zeitaufwand zu nennen, da das gesamte Verfahren inklusive Auswertung ca. 1 bis 2 Tage in Anspruch nimmt. Im Gegensatz zu den Sensorpositionen sind die sehr sensitiven Orientierungsparameter der Kameras nicht als konstant zu betrachten und sollten häufiger, am besten vor und nach jeder Meßfahrt, überprüft werden. Zu diesem Zweck ist geplant, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem ortsunabhängig und in kurzer Zeit die relative und die absolute Orientierung der Kameras überprüft werden kann.

6 Literaturverzeichnis

- CHEN, G., STERNBERG, H.: *Einsatz eines Kalman-Filters zur kinematischen Positionierung eines Landfahrzeuges aus GPS-Daten*. Festschrift "25 Jahre Institut für Geodäsie", Neubiberg, 1998
- GRÄFE, G.: *Beiträge zur Sensorkalibrierung und Integration der Sensoren in das System KiSS*. Diplomarbeit, Universität der Bundeswehr München, 1996 (unveröffentlicht)
- SCHÖDLBAUER, A.: *Rechenformeln und Rechenbeispiele zur Landesvermessung - Teil 2*. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1982
- SCHÖDLBAUER, A.: *Bezugssysteme der Landesvermessung unter Berücksichtigung terrestrischer und satelliten - geodätischer Meß- und Auswerteverfahren*. Schriftenreihe der Universität der Bundeswehr Heft 15, 1984
- SCHREIBER, R.: *Numerische Untersuchungen zur Koordinatentransformation mit geozentrischen Datumparametern*. Schriftenreihe der Universität der Bundeswehr Heft 38 "Moderne Verfahren der Landesvermessung - Teil 1 GPS", Seite 273-288, 1990

- STERNBERG, H., CASPARY, W., HEISTER, H.: *Mobiles Vermessungssystem KiSS*. In : 44. DVW Seminar "Hybride Vermessungssysteme", DVW- Schriftenreihe Nr. 29, Seite 178-192, Wittwer-Verlag, Stuttgart, 1998
- STERNBERG, H., CASPARY, W., HEISTER, H., HOCK, C., KLEMM, J. : *Kinematische Anwendungen von INS/GPS*. 39. DVW-Seminar "Kinematische Meßmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung", DVW-Schriftenreihe Nr. 22, Seite 98-130, Wittwer-Verlag, Stuttgart, 1996

RECHNERGESTÜTZTE KARTOGRAPHIE – KONZEPTION, TECHNIK UND ERSTE ERFAHRUNGEN

Dipl.-Ing. Franz-Josef Gros

Thüringer Landesvermessungsamt
Postfach 907
99018 Erfurt

Zusammenfassung

Der Einsatz von rechnergestützten Methoden in der Kartographie hat in den vergangenen Jahren einen enormen Fortschritt zu verzeichnen. Im Zusammenhang mit den in vielen staatlichen Verwaltungsbe-
reichen stattfindenden Aufbau von Informationssystemen und deren Anwendung in der Bereitstellung
von Informationen und im besonderen von Geoinformationen erlangt eine rechnergestützte Herstel-
lung bzw. Ableitung von Karten eine besondere Bedeutung. Diese Herausforderung stellt sich auch
für eine moderne Vermessungsverwaltung hinsichtlich ihrer amtlichen Landeskartenwerke; selbst
wenn die digitalen Geobasisinformationen bislang zunächst eingeschränkt verfügbar sind aufgrund
des Aufbauzustandes und sich dementsprechend verwenden lassen. Die Aufgabe der Kartographie ist
auch unter den vorhandenen technischen Möglichkeiten nach wie vor so gestellt, daß diese die Geo-
daten veranschaulichen und die Geoinformationen dem Nutzer vermitteln soll. Noch nicht realisiert
sind durchgehend automatische Verfahrenslösungen für eine Kartenoriginalherstellung bzw. -
gestaltung und insbesondere zusammenhängende Methoden für eine rechnergestützte kartographische
Generalisierung.

Mit dem folgenden Beitrag wird auf eine Hard- und Softwarekonfiguration eingegangen, so wie diese
sich seit Jahresbeginn 1997 in der Thüringer Kataster- und Vermessungsverwaltung im Thüringer
Landesvermessungsamt als einem Vertreter der amtlichen Kartographie abbildet. Ausgehend von der
Aufgabenstellung wird über eine Darlegung von konzeptionellen Gedanken die beschaffte Technik
vorgestellt. Die im Rahmen einer Aufbauphase gewonnenen Erfahrungen schließen den Beitrag ab.

1 Einleitung

Bei allen umfangreichen Vorhaben tritt das Verhältnis von verfügbarer Zahl der Mitarbeiter zu gewünschter Fertigstellungsfrist in einem besonderen Maße in den Vordergrund und spielt eine herausragende Rolle. Daß ein derartiger Zeitdruck nicht erst heutzutage auf uns lastet, darüber läßt uns der Ausspruch von Benzenberg in bezug auf das Kataster, daß das Wesentliche am Kataster sei, daß es fertig werde, nicht im Unklaren.

Auf der anderen Seite sehen wir aber auch, daß mit einem hohen technischen Einsatz einem unabweisbaren Zeitlimit sehr wohl entsprochen werden kann; ein Beispiel liefert hier die tägliche Wetterprognose, die auf einer schier unfaßbaren Fülle von kurzfristig zu beschaffenden Einzeldaten sich gründet.

Auch die Kartographie, die in jahrhundertelanger Entwicklung auf einen hervorragenden Stand in technischer und in künstlerischer Sicht gebracht worden ist, sieht sich mehr und mehr Forderungen gegenüber, die in der bisherigen überwiegend noch konventionell gehaltenen Art in der Herstellung und Fortführung von Karten, und insbesondere von topographischen Karten, nicht schnell genug oder wegen Personalmangel überhaupt nicht erfüllt werden können.

So wie bereits seit langem verfahrenstechnische Neuerungen in der Druckereitechnik und in der Reproduktionstechnik die Arbeiten erleichtert und beschleunigt haben, so sind es heutzutage die in allen Bereichen einziehenden rechnergesteuerten Geräte mit mehr oder weniger komplexen Programmsystemen. Auch für die Kartographie, und hier im besonderen für die amtliche Kartographie, ergeben sich dahingehend viele neue Möglichkeiten.

Seit Mitte der achtziger Jahre werden bei den einzelnen Behörden der deutschen Landesvermessung topographische Informationen, als Geobasisdaten bezeichnet, im Rahmen des bundesweiten einheitlichen Vorhabens ATKIS¹ für das Digitale Landschaftsmodell 1 : 25 000 (Basislandschaftsmodell) in definierten Phasen erfaßt und in einer objektstrukturierten Weise in einer relationalen Datenbank für eine Nutzung vorgehalten bzw. abgegeben. Die Nutzung der Geobasisdaten ist in erster Linie kundenorientiert ausgelegt. Doch sollen diese raumbezogenen Geobasisdaten auch für eigene Zwecke der deutschen Landesvermessung, d.h. der Ableitung von digitalen topographischen Karten, herangezogen werden, also einen wesentlichen Grundbestandteil zur rechnergestützten bzw. digitalen Kartographie bilden. Denn nach wie vor ist in den jeweiligen deutschen Landesvermessungsgesetzen² die Aufgabe festgehalten, daß die Ergebnisse der topographischen Landesaufnahme in den Landeskartenwerken darzustellen und auf dem neuesten Stand zu führen sind. Die Ergebnisse der topographischen Landesaufnahme sind dabei im ATKIS zu führen.

2 Aufgabenstellung

Der Umfang der amtlichen Landeskartenwerke, für welche die Thüringer Kataster- und Vermessungsverwaltung (TKVV) zuständig ist, geht aus der Tabelle 1 hervor. Die Topographischen Karten werden dabei nach Grund- und Folgemaßstab unterschieden sowie nach derzeitig verfügbaren Sonderkarten.

Kartenwerk	Kartenblätter	Charakter
Topographische Karte 1 : 10 000 (TK10)	581	GM ³

¹ ATKIS: Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem

² z.B.: Thüringer Landesvermessungsgesetz (ThLVermG) vom 30.01.1997, Gesetz- und Verordnungsblatt für den Freistaat Thüringen, Nr. 4, 1997, S. 69 - 71

³ GM: Grundmaßstab

Topographische Karte 1 : 25 000 (TK25)	128	FM ⁴
Topographische Karte 1 : 50 000 (TK50)	31	FM
Topographische Karte 1 : 100 000 (TK100)	9	FM
Übersichtskarte Thüringen 1 : 250 000 (ÜKTh250)	1	SK ⁵
Gemeindegrenzenkarte Thüringen 1 : 250 000 (GTh250)	1	SK
Thüringer Kreisgrenzenkarte 1 : 100 000 (TKK100)	17	SK
Wanderkarte 1 : 25 000 (TK25W)	derzeit 13	SK
Wanderkarte 1 : 50 000 (TK50W)	derzeit 4	SK
Bodenrichtwertkarte 1 : 100 000 , 1 : 350 000	derzeit 18	SK

Tabelle 1: Übersicht „Amtliche Landeskartenwerke und Sonderkarten“

Die Herstellung und Bearbeitung der amtlichen Landeskartenwerke des Freistaates Thüringen erfolgt bislang noch nach den bekannten konventionellen kartographischen Verfahrensweisen über Gravur auf beschichteten Folien mit anschließender Herstellung der Druckfilmvorlagen. Diese Vorgehensweise erfordert einen hohen Aufwand in Material, Zeit, Arbeitskrfteinsatz und damit insgesamt ein enormes Kostenaufkommen, welches durch die Institution Landesvermessungsamt über einen öffentlichen Haushalt finanziert aufzubringen ist. Die Topographischen Karten sollen gemäß dem Gesetzesauftrag in einem zeitgemäßen und aktuellen Zustand hergestellt und vorgehalten werden, so daß diese den allgemeinen Bedürfnissen aus den Bereichen Wirtschaft, Wissenschaft, Recht und Verwaltung genügen. Diesem doch recht hohen Anspruch kann eine Dienstleistungsverwaltung, so wie sich ein Landesvermessungsamt zu verstehen hat, nur unter der Einführung und Nutzung von neuen Techniken gerecht werden. Verschärfend auf diesen Sachverhalt wirkt sich die zunehmende Reduzierung von speziellen Materialien, z.B. beschichtete Gravurfolien, im Rahmen der Herstellung und Bearbeitung von topographischen Karten aus. Hinzukommt noch die Begrenztheit von verfügbarer Personalkapazität. Dies ist ein normal einzustufender Aspekt, der sich aus Gründen der Ressourceneinsparung, des Umweltschutzes und der allgemeinen Forderung nach einer „schlanken Verwaltung“ ergeben hat. Unter der gegenwärtig herrschenden Forderung einer Reformierung von Organisationsstrukturen, d.h. Reduzierung von Arbeitskräften in den öffentlichen Verwaltungen, Einführung von neuen Steuerungsmodellen und allgemein knapper werdenden öffentlichen Haushaltsmitteln zur Erbringung und Vorhaltung von staatlichen Leistungen ist auch die amtliche Landesvermessung gefordert, ihren Beitrag dazu zu leisten. Die amtliche Landesvermessung hat sich der Aufgabe zu stellen nach neuen rationalen Methoden und Techniken, insbesondere in der Herstellung und Bearbeitung von topographischen Karten, zu suchen und in die Praxis umzusetzen. Rechnergestützte Verfahrensweisen bieten hier verschiedene Lösungen an.

Für die TKVV soll die Umstellung von der bislang analogen auf eine rechnergestützte Herstellung und Bearbeitung der amtlichen Landeskartenwerke mittelfristig die nachstehend aufgeführten Ziele erreichen:

- ◆ Effektivität und Rationalisierung in den jeweiligen Verfahrensabläufen zur Kartenherstellung und -bearbeitung.
- ◆ Qualitative Verbesserungen in der inneren Genauigkeit der Topographischen Karten und in der gegenwärtigen Erscheinungsweise
- ◆ Abbau eines bestehenden Aktualitätsrückstandes in den amtlichen Landeskartenwerken des Freistaates Thüringen
- ◆ Erreichen eines Fortführungszyklus' von fünf Jahren für die amtlichen Landeskartenwerke
- ◆ Zeitnahe Übereinstimmung zwischen dem Inhalt der amtlichen Landeskartenwerke und der Geobasisinformationen des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems der amtlichen Landesvermessung
- ◆ Aufbau einer digitalen kartographischen Datenbank mit einer blattschnittfreien Datenhaltung

⁴ FM: Folgemaßstab

⁵ SK: Sonderkarte

- ◆ Nutzung und Integration der Geobasisinformationen aus ATKIS im Rahmen der Herstellung und Bearbeitung der amtlichen Landeskartenwerke
- ◆ Einsparung von Haushaltsmitteln bei der Herstellung und Bearbeitung der amtlichen Landeskartenwerke
- ◆ Reformierung von bestehenden inneren Organisationsstrukturen der amtlichen Landesvermessung

3 Konzeptionelle Arbeiten und deren Umsetzungen

Im Jahre 1994 hat das Thüringer Landesvermessungsamt begonnen, sich mit der Aufgabenstellung zu beschäftigen, die analogen kartographischen Kartenherstellungs- und Bearbeitungsvorgänge durch rechnergestützte Methoden ablösen zu wollen. Diese Bestrebungen mündeten in einer konzeptionellen Darstellung MAPSYS (1994) zur Automatisierung der Kartographie, vornehmlich für den Grundmaßstab 1 : 10 000. Diese Arbeit wurde durch ein auf kartographische Systeme und Dienste spezialisiertes Ingenieurbüro im Rahmen eines Werkvertrages durchgeführt und Ende 1994 dem Thüringer Landesvermessungsamt vorgestellt. Betrachtungsschwerpunkt dieser Konzeption war und ist das Ziel, die amtlichen Landeskartenwerke, und hier wieder vordergründig für den Grundmaßstab 1 : 10 000, als signaturierten vektoriellen Datenbestand herzustellen und aktuell vorzuhalten. In der Konzeption wurden neben der rein vektoriellen Arbeitsweise aber auch die Möglichkeiten der hybriden Kartenherstellung und Bearbeitung angesprochen und deren Vor- und Nachteile gegenübergestellt neben monetären Aspekten. Die getroffenen Aussagen führten nochmals zu Diskussionen und einer Überprüfung der hausinternen Zielvorstellungen zur Automatisierung der Kartographie, was sich Mitte 1995 in Ergänzungsarbeiten zur konzeptionellen Darstellung niederschlug. Da es unmöglich ist, einen Wechsel der Arbeitsweisen und Verfahrenstechniken zu einem bestimmten Zeitpunkt in einer unmittelbaren Abhängigkeit von vorhandenem Personalbestand vornehmen zu können, wurde ein sukzessives Vorgehen in der Umstellung von analog nach digital als die sinnvollste Lösung angesehen. Begonnen werden soll mit dem Grundmaßstab. Die Folgemaßstäbe sollen dann im nachhinein folgen, wobei die Vorstellung gegeben ist, daß auf den gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnissen aufgebaut werden kann. Dieser Prozeß wird insgesamt als mittelfristig angesehen, d.h. für die Umstellung auf digitale Herstellungs- und Bearbeitungstechniken der amtlichen Landeskartenwerke ist von einem Gesamtzeitaufkommen zwischen fünf und acht Jahren nach der gegenwärtigen Situation auszugehen.

Die Ausgangsgrundlage für die kartographischen Vektordaten stellt dabei zuerst ein Rasterdatenbestand dar. Dieser muß in einer hinreichenden Qualität, d.h. in einem Auflösungsvermögen geschaffen werden bzw. vorliegen. Die Auflösung der Rasterdaten beeinflusst in einem erheblichen Maße eine saubere Umsetzung von gegebenen analogen kartographischen Sachverhalten in gerichtete Graphen im Rahmen der Möglichkeiten einer parametergesteuerten rechnergestützten Zeichenerkennung (= Vektorisierung). Im Hinblick auf diese Voraussetzung erfolgte im Sommer 1995 die Ausschreibung und gegen Jahresende 1995 die Beschaffung und Installation eines Arbeitsplatzes Trommelscanner/-recorder mit einem Filmentwicklungsautomaten. Das Kernstück dieses Arbeitsplatzes bildet der hochauflösende Trommelscanner/-recorder der Firma LÜSCHER Maschinenbau AG des Modells LSP120, der eine Auflösung im Bereich von 52 L/cm bis 1260 L/cm anbietet. Die Genauigkeit des LSP120 liegt im Bereich von $\pm 0,2$ mm. Damit erfüllt er kartographische Anforderungen sowohl in der Datenerfassung als auch in der Datenwiedergabe. Die Steuerrechnereinheit stellt derzeit eine SUN-Sparc-Lösung auf UNIX-Ebene mit den nachstehenden technischen Angaben dar: 1 MB Supercache, 512 MB RAM, 3,5" FDD, 9 GB HDD, CD-ROM. An Peripheriegeräten sind vorhanden: 2 * 9 GB HDD, 4-mm-DAT-DD, 8-mm-EXABYTE-DD und ein 20"-Farbmonitor. An weiteren Rechnerkomponenten zu diesem Trommelscanner/-recorder wurden mitbeschafft: 1 PC „COMPAQ Deskpro 6000“ mit 16 MB RAM, 2,5 GB HDD, CD-ROM, 3,5" FDD, 15"-Farbmonitor als Einheit für den Einsatz eines Raster-Image-Processors (RIP) sowie 1 Power-Mac 8500 mit 128 MB RAM, 2 GB HDD, CD-ROM, 3,5" FDD, 20"-Farbmonitor mit externen Einheiten: ein 200 MB-Wechselplattenlaufwerk und ein Tintenstrahldrucker HP Design Jet 350 C. Auf dem Mac kommt die Bildverarbeitungssoftware PHOTOSHOP zum Einsatz. Diese technische Ausstattung wurde insgesamt dem Dezernat „Digitale Kartographie“ zugeordnet, wobei dieses Dezernat gleichfalls im Dezember 1995 als neue Struktureinheit

des Thüringer Landesvermessungsamtes geschaffen wurde im Rahmen der Herauslösung des Thüringer Landesvermessungsamtes aus dem Thüringer Landesverwaltungsamt und einer damit einhergehenden grundlegenden Reorganisation des Landesvermessungsamtes.

Mit dieser technischen Ausstattung lassen sich auch noch andere Arbeiten ausführen, die in das Aufgabenspektrum eines Landesvermessungsamtes fallen und nicht unmittelbar der Kartenherstellung und -bearbeitung zuzuordnen sind. Hierzu gehören z.B. das Plotten von Orthophotos auf Film als Serviceleistung für das Dezernat Digitale Photogrammetrie, die Herstellung und das Plotten von farbseparierten Druckfilmvorlagen sowohl für eigene Druckerarbeiten als auch für Dritte, das Plotten von Schummerungen und Luftbildkarten auf Film als Druckvorlage.

Mit Beginn des Jahres 1996 konnte mit dieser technischen Ausstattung, nachdem eine Arbeitskraft in diesen Arbeitsplatz eingewiesen worden war, begonnen werden die ersten Erzeugnisse zu produzieren. Die schwerpunktmäßige Auslastung lag dabei auf dem Plotten von Orthophotos, die das Dezernat Topographie als eine wesentliche Grundlage nutzt, um die Arbeitsunterlagen für die Aktualisierung (= Fortführung) der amtlichen Kartenwerke zu schaffen. Die Nutzung dieses Arbeitsplatzes setzte sich auch 1997 unter diesem Gesichtspunkt fort und wird auch in 1998 sich so im Arbeitsprogramm abbilden. Die bislang erzielten Arbeitsergebnisse mit dem hochauflösenden Trommelscanner/-recorder lassen sich qualitativ als sehr gut bezeichnen. Ein kleiner Nachteil ist bei dieser Systemlösung nicht zu verhüllen: einer qualitativ guten Umsetzung von analogen Vorlagen in eine digitale Form stehen relativ lange Erfassungszeiten durch das Scannen gegenüber. Ebenso verhält es sich beim Plotten, wenn den Dateien ein hoher Auflösungswert zugrunde liegt und eine große Datenmenge damit verbunden ist.

Im Jahresverlauf 1996 wurde begonnen, sich konkret mit den Erfordernissen von kartographischen Arbeitsplätzen zur rechnergestützten Herstellung und Bearbeitung von Topographischen Karten auseinanderzusetzen. Dies erfolgte auf der Grundlage der v.g. konzeptionellen Darstellung. Einzelne bestehende technische Lösungen bei ausgewählten Landesvermessungsämtern, d.h. Hard- und Software sowie Verfahrensabläufe, wurden vor Ort aufgesucht und vor dem Hintergrund der eigenen Aufgabenstellung betrachtet und bewertet. Dabei handelte es sich in der überwiegenden Anzahl um hybride Verfahrensweisen in der Herstellung und Bearbeitung von Topographischen Karten, die auf unterschiedlicher Hardware implementiert waren. Dieser Sachverhalt ist aber nicht als ungewöhnlich zu interpretieren. In den Schwesterverwaltungen ist nicht in dieser Weise die Ausgangssituation gegeben gewesen so wie diese sich für das Thüringer Landesvermessungsamt ergeben hat. Die Schwesterverwaltungen sind vielfach den Zwängen ausgesetzt gewesen, Rücksicht auf schon vorhandene Techniken nehmen zu müssen, die sich aus bestehenden Systemlösungen ergeben haben. Für das Thüringer Landesvermessungsamt stellte sich eine derartige Situation nicht, sondern als völlig offen und neutral dar. Es wurde lediglich ein Betrachtungsschwerpunkt auf eine Kompatibilität mit anderen Systemlösungen gelegt, die sich über eine möglichst umfassend funktionierende und realisierte Schnittstellenlösung abbilden soll. Parallel zu diesen Bestrebungen erfolgte zudem eine Testinstallation von einem kartographischen Arbeitsplatz im Thüringer Landesvermessungsamt mit dem Ziel praktische, eigene Erkenntnisse zu gewinnen. Das Angebot und die Gelegenheit das Funktionalitätsspektrum der kartographischen Software umfassend kennenzulernen und auf amtliche topographische Karten anwenden zu können, wurde durch die Firma MAPTECH AG dem Thüringer Landesvermessungsamt unterbreitet. Hierbei handelt es sich um eine Systemlösung, die im wesentlichen aus zwei leistungsfähigen Bausteinen besteht: dem MAPTECH-Capturing-System (MCS) und dem MAPTECH-Mapping-System (MMS). Eine relationale Datenbank ist mit dieser Systemlösung verbunden, so daß die erzeugten kartographischen Vektordaten in einer objektstrukturierten Form blattschnittfrei oder auch nach Einrichtung nach Kartenblatteinteilung gespeichert werden können und somit einer Fortführung zur Verfügung stehen. Insgesamt betrachtet darf wohl bei dieser Systemlösung durchaus von einem Kartographischen Informationssystem gesprochen werden, da wesentliche Funktionalitäten, die auch ein Geographisches Informationssystem definieren, in dieser Systemlösung mit vorhanden sind. Ein wesentlicher Aspekt, der mit dieser Software umgesetzt ist und für Bildschirmarbeiten im Vordergrund steht, ist das Prinzip WYSIWYG⁶. Für Kartographen umgesetzt bedeutet dies: Tausch des Gra-

⁶ WYSIWYG: What you see is what you get

vurrings mit der Mouse. Der Kartograph sieht somit unmittelbar am Bildschirm seine ausgeführten Bearbeitungsvorgänge. Korrekturen lassen sich leicht und problemlos vornehmen, ebenso lassen sich leicht verschiedene Darstellungsvarianten zur Entscheidungsfindung erzeugen. Der Kartograph arbeitet auch nicht mehr in diesem Sinne vorlagengetreunt, sondern hat jederzeit direkten Zugriff auf alle Kartenelemente. Das so erzeugte Kartenbild läßt sich unmittelbar abspeichern bzw. auch über eine Plotausgabeeinrichtung als Entwurf ausgeben.

Das MapTech-System umfaßt damit eine vollständige Produktionslinie zur rechnergestützten Herstellung und Bearbeitung von Karten; in dieser Systemlösung ist ein vollständiger Datenfluß von der Datenerfassung bis zur kartographischen Ausgabe realisiert, so daß von digitaler Kartographie gesprochen werden darf.

Die Testinstallation konnte über den ganzen Jahresverlauf 1996 erprobt werden. Dies erfolgte im Rahmen einer Herstellung und Bearbeitung einer Topographischen Karte 1 : 10 000 als Testblatt. Um diese leistungsfähige Software beherrschen und umfassend testen zu können, erfolgten umfangreiche, intensive Einweisungs- und Schulungsmaßnahmen, die durch die Firma MAPTECH AG durchgeführt wurden. Kooperiert wurde während dieses Zeitraumes mit dem Landesvermessungsamt Sachsen; diese Schwesterverwaltung zeigte die gleichen Bestrebungen die analoge Kartographie zu automatisieren.

Im Sommer 1996 wurde im Thüringer Landesvermessungsamt begonnen, die öffentliche Ausschreibung für die Beschaffung von kartographischen Arbeitsplätzen vorzubereiten, die im Herbst durchgeführt wurde. Aufgrund des beabsichtigten Volumens erfolgte die Ausschreibung europaweit. Namhafte und qualifizierte Angebote gingen daraufhin termingerecht ein und mußten entsprechend bewertet werden. Unter der Prämisse einer rein vektororientierten Kartenherstellung und -bearbeitung sowie der gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen wurde auf der Grundlage einer erstellten Synthese die Bewertung durchgeführt und eine Entscheidung herbeigeführt. So konnte zum Jahreswechsel 1996/97 eine Grundausstattung von fünf kartographischen Arbeitsplätzen der Firma MAPTECH AG mit einem weiteren Arbeitsplatz zur Plotausgabe beschafft und installiert werden. Die Software ist lizenziert und teilt sich auf in zwei Lizenzen MCS und drei Lizenzen MMS. Als Betriebssystem liegt AIX zugrunde, da die Hardware aus IBM-Rechnern des Typs RS 6000 besteht. Die Rechnerarchitektur ist auf eine Client-Server-Lösung ausgelegt, wobei die Clients hardwaremäßig die folgenden Merkmale ausweisen: 64 MB RAM, 1,2 GB HDD, CD-ROM, 3,5" FDD, 21"-Farbmonitor. Der Server entspricht den gleichen Merkmalen, jedoch sind an diesem noch externe Einheiten angeschlossen: 10 GB HDD, 4-mm-DAT-DD, 8-mm-EXABYTE-DD. Als relationale Datenbank kommt INGRES zum Einsatz. Die Ausgabeeinheit ist ein auf SUN-Sparc basierender Printserver mit angeschlossenem Tintenstrahlplotter vom Typ NOVAJET vom Format DIN A 0 mit einer Auflösung 300 dpi * 300 dpi. Alle Rechnerkomponenten, d.h. der Arbeitsplatz Trommelscanner/-recorder mit seinen Rechnereinheiten und die kartographischen Arbeitsplätze sind in einem in-house-LAN integriert. Dabei zeigte sich, daß, wenn kartographische Daten im Umfange eines Kartenblattes 1 : 10 000 von einem Arbeitsplatz zu einem anderen Arbeitsplatz über das LAN transferiert wurden, mit zeitintensiven Reaktionen der Hardware zu rechnen ist. Dies liegt in erster Linie an der bestehenden Konfiguration des LAN mit einer Kapazität von 10 Mbit/sec. Eine höhere Durchsatzkapazität mit 100 Mbit/sec sowie die Anwendung von anderen Materialien in der Netzwerktechnologie schaffen hier Abhilfe, sind jedoch vorerst nicht umsetzbar. Um einen Support für die kartographischen Arbeitsplätze in der Handhabung der Software nutzen sowie auftretende Funktionsstörungen bzw. -defizite beheben zu können, wurde zusätzlich ein Modemanschluß eingerichtet. Diese Einrichtung hat sich bewährt.

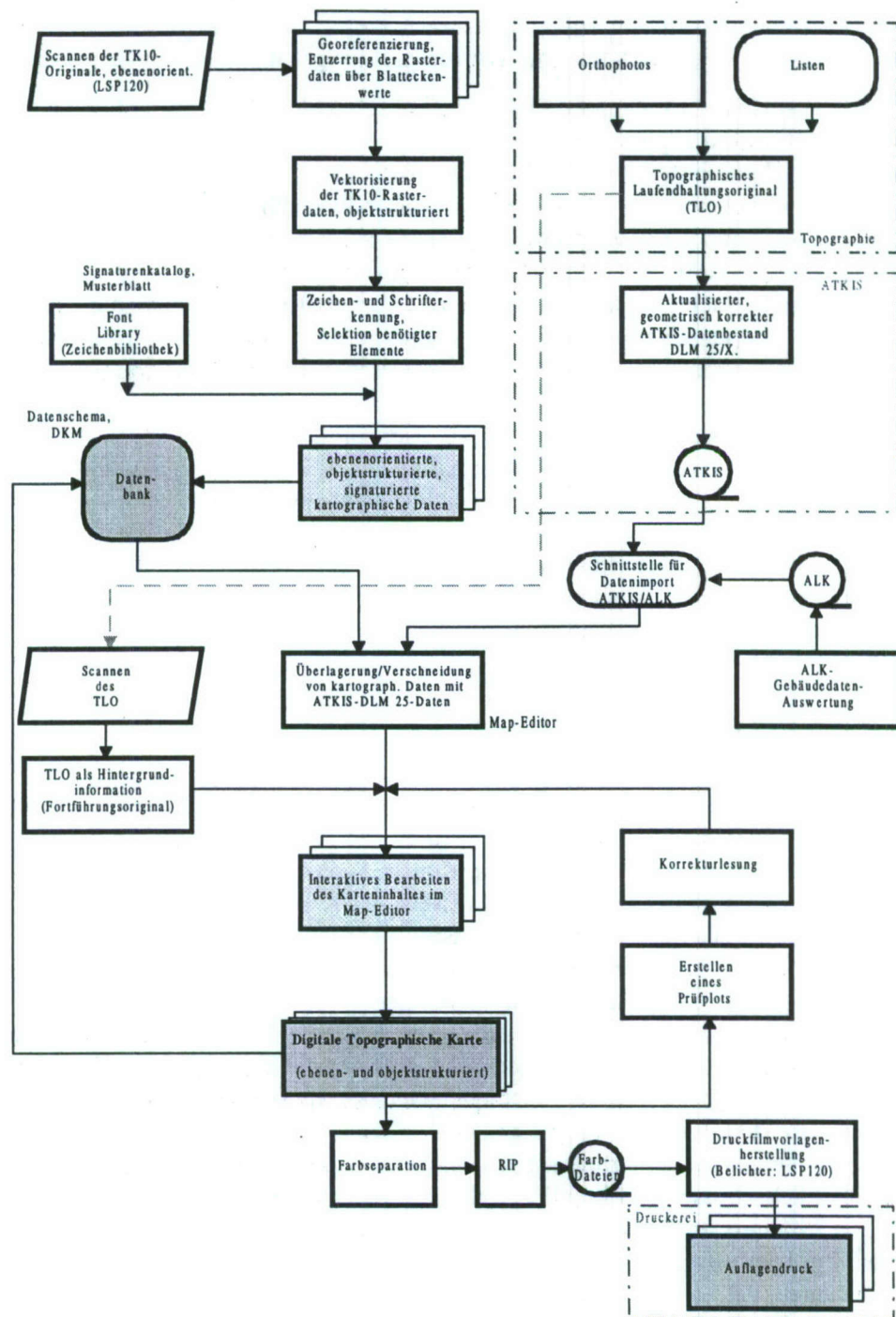


Abbildung 1

Verfahrensablauf Herstellung und Bearbeitung Digitaler Topographischer Karten, dargestellt am Beispiel der Topographischen Karte 1 : 10 000

Während der Testinstallation bestand das Personal aus zwei Mitarbeitern. Mit Jahresbeginn wurde das Erprobungsteam personell aufgestockt, in die Arbeitsplätze eingewiesen bzw. in einigen Detailfunktionalitäten noch nachgeschult. Mit Beginn des 2. Quartals 1997 konnte begonnen werden, auf der

Grundlage von zunächst vier Topographischen Karten 1 : 10 000 einen Verfahrensablauf für die beabsichtigte Produktion aufzustellen. Dieser Verfahrensablauf gründet sich zunächst auf nach einzelnen Ebenen aufgeteilt gescannten Folien der Topographischen Karte 1 : 10 000, die mit dem Programmbaustein MCS in Vektordaten umgesetzt und mit dem Modul MMS kartographisch bearbeitet werden bis hin zu einem Zustand, der für die Topographische Karte 1 : 10 000 durch die ThürZIR-TK10⁷ definiert ist. Der Verfahrensablauf geht, in einer groben Struktur gehalten, aus der Abbildung 1 hervor.

Für die weitere Zukunft ist vorgesehen und angedacht, auf ATKIS-Daten, die das Basislandschaftsmodell vom Informationsumfang der Maßstabsbereiche 1 : 10 000 bis 1 : 100 000 umfassen, aufzubauen und aus diesen digitale topographische Karten abzuleiten. Dieser Sachverhalt ist noch mit einigen offenen Fragen versehen, obwohl die Erfassungsgrundlage für das Basislandschaftsmodell der TKVV die analoge Ausgabe der Topographischen Karte 1 : 10 000 darstellt. Der derzeit realisierte inhaltliche Umfang des Basislandschaftsmodells läßt aus kartographischer wie auch aus allgemein informationstechnischer Betrachtungsweise lediglich eine Ableitung von sogenannten Präsentationsgraphiken zu, keinesfalls jedoch eine topographische Karte mit dem bislang gewohnten qualitativen und quantitativen Informationsgehalt. Ein anderer Aspekt, welcher durchaus mit einigen Schwierigkeiten behaftet zu sein scheint, ist die angedachte Übernahme von ausgewählten Informationen aus der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK). Interessant erscheint hier die Überführung der Gebäudegeometrien und dazugehörigen Semantik für die Ableitung der definierten Signaturen resp. Symboliken. Die Schnittstellenproblematik ist jedoch hierbei nicht das eigentliche Problem, sondern hier treten Fragen aus dem Bereich der Generalisierung (z.B. Vereinfachen, Auswählen/Weglassen, Zusammenfassen, Verdrängen, Bewerten/Betonen, Klassifizieren, Vergrößern) auf, die teils automatisiert teils aber nur über eine interaktive Bearbeitung beantwortet werden können und nach wie vor den Sachverstand sowie die Erfahrungen eines Kartographen benötigen.

4 Erste Erfahrungen

Bevor mit der eigentlichen Kartenherstellung bzw. -bearbeitung angefangen werden konnte, mußte eine entsprechende Arbeitsvorbereitung getroffen werden. Die Arbeitsvorbereitung besteht in der Nutzung der MMS-Programmfunktionalitäten für die Konstruktion und einer Attributierung der Kartensymbolik sowie für die Definition des Zeichenschlüssels, des Kartenrahmens, der Kartennetze und der Kartenbeschriftung. Ein Font-Editor dient zur Konstruktion der Kartensymbolik. Es können Linien-, Flächen-, Symbol- und Text-Fonts konstruiert werden. Das WYSIWYG-Prinzip ermöglicht dabei eine optimale Beurteilung der Symbole. Neben mehreren Hilfsfunktionen stehen auch Freihand-Möglichkeiten zur Verfügung. Diese einmal erstellten Basis-Fonts lassen sich in einem Zeichenschlüssel-Editor beliebig attributieren und auch skalieren. Der Zeichenschlüssel-Editor legt zudem den Inhalt des Kartenbildes fest. Dieses geschieht mit Hilfe übersichtlicher Gruppierungen und Listen. D.h. mit diesem Modul werden die kompletten, relational abgelegten Datenbankstrukturen verwaltet. Diese beinhalten auch die Farbpalette der logischen Farben. Für die Topographische Karte 1 : 10 000 wurde als Zeichenvorschrift die ACD12, die jetzige ThürZIR-TK10, als verbindliche Grundlage für diese durchzuführenden Arbeiten herangezogen und als Zeichenschlüssel in die Softwareumgebung implementiert. Dies erforderte einen zeitlichen Aufwand von ca. fünf Wochen. Zu beachten galt es bei diesen Arbeiten, daß im Hinblick auf eine zukünftige Übernahme von Geobasisdaten aus dem ATKIS die zu erstellende kartographische Datenstruktur dahingehend übernommen bzw. angepaßt werden mußte. Dabei zeigte sich, daß nicht in allen Fällen ATKIS kartographischen Gegebenheiten derzeit gerecht werden kann aufgrund der vorgegebenen Objektstrukturierung des ATKIS-Objektartenkataloges für das Basislandschaftsmodell, aber auch, daß bestimmte kartographische Sachverhalte nicht über die ATKIS-Objektstruktur sich abbilden lassen aufgrund fehlender semantischer Informationen. Ein weiterer Effekt, der sich in diesem Zusammenhang ergab, äußerte sich darin, daß einige Symbole nicht dv-freundlich ausgelegt sind. Dies ist vor dem Hintergrund der Entste-

⁷ ThürZIR-TK10: Thüringer Zeichenvorschrift, Instruktion und Redaktionsanweisung für die Bearbeitung der Topographischen Karten 1 : 10 000 und des Topographischen Stadtplanes 1 : 10 000 (ThürZIR-TK10), Thüringer Innenministerium, Kataster- und Vermessungswesen, Erfurt, August 1997

ungsweise der Zeichenvorschrift aber nicht als ein Vorwurf zu interpretieren. Vielmehr ist es als ein wichtiger Hinweis für eine diesbezügliche Überarbeitung von Zeichenvorschriften resp. Musterblätter für die Herstellung bzw. Ableitung von Topographischen Karten zu verstehen, wenn man dem Ziel gerecht werden will, auf der Grundlage von ATKIS-Daten moderne digitale Topographische Karten herstellen und fortführen zu wollen.

Ein weiterer Arbeitsvorbereitungsschritt stellte die Umsetzung der einzelnen Folien der ausgewählten analogen Topographischen Karten 1 : 10 000 (TK10) in Rasterdateien dar. Dieses erfolgte mit dem Arbeitsplatz Trommelscanner/-recorder. Dabei galt es zu klären, was als geeignete Auflösung für die Rasterdaten zu wählen ist, um diese anschließend unter Nutzung der Funktionalitäten des Programmes MCS in Vektordaten umwandeln zu können. Es galt, eine Auflösung zu finden, die zum einen gerade noch die Feinheiten einer TK10 mit der zugrundeliegenden geometrischen Genauigkeit wiedergibt und zum anderen aber nicht durch eine zu hoch angesetzte Auflösung unnötig die Speicher- und damit auch die Rechnerkapazitäten (Zeitverhalten) des kartographischen Systems belastet. Aus umfangreichen Versuchen ergab sich für die Auflösung ein Wert von 800 dpi (= 315 L/cm). Mit diesem Auflösungs Wert wurden die einzelnen Folien der TK10 als Rasterdateien erstellt. Die so erhaltenen Rasterdateien wurden einzeln der automatischen Vektorisierung unterworfen. Vor der eigentlichen Vektorisierung steht eine Entzerrung und eine Georeferenzierung der jeweiligen Rasterdateien. Das Transformieren des Kartenbildes auf die Sollmaße sowie das Zuweisen der Blattecken mit den zugehörigen Koordinatenwerten definieren damit das zu bearbeitende Map-Image. Die Vektorisierungsläufe wurden ausschließlich im Batch-Betrieb durchgeführt, d.h. zusammengefaßt zu einem „Über-Nacht-Lauf“. Voraussetzung für eine erfolgreiche Vektorisierung stellte dabei das Setzen von optimalen Parameterangaben für das Umsetzen von Raster nach Vektor dar. Ausgegangen wurde hierbei von übermittelten Parameterangaben des Softwareentwicklers, die sich jedoch nach genauerem Betrachten der erzielten Resultate noch in einem erheblichen Umfange optimieren ließen. Damit ergaben sich auf dem empirischen Wege für die Vektorisierung optimale Parameterangaben, die eine Differenzierung nach der jeweiligen Folie (z.B. Grundriß, Vegetation, Gewässer, Relief) sowie nach der zeichnerischen Qualität der ausgeführten Foliengravur einschließlich der im Laufe der Zeit durch eingetretene Fortführungsmaßnahmen vorgenommenen Reproduktionsvorgängen (= Kontern von einzelnen fortgeführten Gravurfolien bzw. Druckfilmvorlagen) erlauben. Diese Arbeiten benötigten für die vier TK10-Blätter, wobei eine TK10 durchschnittlich zwischen zehn bis dreizehn einzelne Folien besitzt, einen Zeitraum von rd. acht Wochen. Auf der Grundlage dieser Untersuchungen läßt sich als Ergebnis festhalten, daß nun für die Vektorisierung Parameterwerte vorliegen, die es erlauben innerhalb eines Zeitraumes von ca. zwei Wochen ein analoges TK10-Blatt in eine digitale, objektstrukturierte TK10 zu überführen einschließlich einer anschließenden Überprüfung der so generierten kartographischen Vektordaten. Diese Daten wurden im Anschluß mit einem Übernahmeprogramm vom MCS in das MMS überführt. Mit dem Funktionalitätsspektrum des für die TK10 konditionierten MMS erfolgte die redaktionelle Bearbeitung sowie die Kartenfortführung. Speziell mit dem Map-Image-Editor steht ein Werkzeug zur Verfügung, mit welchem die Daten bearbeitet werden können und im weiteren die Grundlagen zur Herstellung der Kartenlegende bietet.

Für die so erstellten TK10-Blätter lagen jeweils die Topographischen Laufendhaltungsoriginale (TLO) vor. Die TLO stellen die Arbeitsunterlage für die Fortführung der TK10 dar. Sie werden durch die Topographie über die Arbeiten des Topographischen Meldedienstes aufgestellt und der Kartographie im Rahmen des Bearbeitungszyklus bereitgestellt. Diese TLO wurden ebenfalls in farbwertorientierte Rasterdateien mit dem Arbeitsplatz Trommelscanner/-recorder umgesetzt. Die jeweils zutreffende entzerrte und georeferenzierte Rasterdatei wurde der vektorisierten und signaturierten TK10 als Hintergrundinformation beigelegt, so daß der Bearbeiter am Bildschirmarbeitsplatz beide Informationen zur Verfügung hatte. Versuchsweise wurde dies auch mit gegebenen aktuellen digitalen Orthophotos durchgeführt, wobei sich jedoch herausstellte, daß dies nicht so geeignet ist, weil eine differenzierte Interpretationsfähigkeit für das Orthophoto beim Kartographen notwendig ist, die aber nicht nach den gegebenen Verhältnissen vorhanden ist. Mit den gegebenen Funktionalitäten des MMS wurden die fortzuführenden topographischen Sachverhalte kartographisch in den bestehenden Vektordatenbestand interaktiv eingearbeitet und abgespeichert. Die fortzuführenden Sachverhalte hatten unterschiedlichen Umfang und Qualität bei den vier TLO bzw. TK10. Somit kam es zu einem unterschiedlichen Zeitaufwand bei den Fortführungsarbeiten. Doch läßt sich eine durchschnittliche Aussage for-

mulieren: Für eine TK10 läßt sich ein Zeitraum von rd. vier bis fünf Wochen veranschlagen, die die Fortführung einschließlich einer anschließenden redaktionellen Lesung des fortgeführten TK10-Blattes umfaßt.

Mit dem Modul Map-Publisher wurde im Anschluß der Kartenrahmen und das Kartennetz definiert, attribuiert sowie die Randbeschriftung gefertigt. Mit diesem Programmbaustein wird insgesamt die Karte definiert, d.h. die Anordnung des eigentlichen Kartenbildes, des Kartenrahmens, die Legendenplatzierung und die Titel- bzw. zusätzlichen Randbeschriftungen.

Für die Ausgabe der mit diesem Programmsystem erstellten Karten wird primär das Post-Script-Datenformat verwendet. Der Plotauftrag läßt sich unmittelbar aus dem Programmsystem starten, um Plots für verschiedene Entwurfsdarstellungen oder für die redaktionelle Lesung zu erhalten. Der Plotauftrag läßt sich aber auch separat in eine Queue schreiben, die dann vom Printserver, z.B. zu einem bestimmten Zeitpunkt, abgearbeitet werden kann. Ein entsprechendes Farbseparierungsprogramm (Separation Editor) erlaubt die Herstellung der Druckfilmvorlagen in Form von farbseparierten, farbigen oder auch schwarz-weißen PostScript-Dateien. Die Funktionalitäten dieses Programmbausteines lassen die Festlegung eines Filmes, der Rasterweite, der Rasterfrequenz, des Rasterwinkels, der Rasterpunkte sowie Optionen zur Freistellung, Aussparung/Überdruck und Übergriff zu. Diese so erstellten Ausgabedateien wurden dann an das vorhandene RIP⁸ zur Belichtung gesandt, worauf im folgenden die Druckfilmvorlagen über den Arbeitsplatz Trommelscanner/-recorder erstellt werden konnten. Diese belichteten und entwickelten Filme stehen dann unmittelbar als Originale einem Auflagendruck zur Verfügung.

Insgesamt betrachtet läßt sich für eine Topographische Karte 1 : 10 000 einschließlich der geschilderten Fortführungsmethodik (bei durchschnittlichem Aktualisierungsumfang) von der Datenerfassung bis zur Originalherstellung der Druckfilme bei Unterstellung eines routinierten Arbeitsablaufes ein Zeitraum von rd. sieben bis acht Mannwochen angeben.

5 Ausblick

Mit der für die TKVV beschafften und im Thüringer Landesvermessungsamt installierten Grundausstattung von kartographischen Arbeitsplätzen sowie des Arbeitsplatzes Trommelscanner/-recorder konnte ein wesentlicher Schritt in der Automatisierung der Kartographie ausgeführt werden. Die mit bedeutenden Investitionsmitteln beschaffte Systemlösung erfüllt zumindest nach den gegenwärtigen wissenschaftlichen Erkenntnissen im wesentlichen alle Anforderungen eines modernen digitalen kartographischen Produktionssystems, so wie diese durch HURNI/CHRISTINAT (1996) formuliert sind.

Die Technologie in der Herstellung und Fortführung der amtlichen Landeskartenwerke der TKVV wird zukünftig ausschließlich digital sein, was anhand des Verfahrensablaufes für die Herstellung und Bearbeitung der Topographischen Karte 1 : 10 000 aufgezeigt wurde. Gegenüber der konventionellen Kartenbearbeitung besitzt die neue Technologie wesentliche Vorteile, die sich dahingehend äußern, daß nur noch in ganz wenigen Fällen zusätzliche reproduktions-technische Arbeiten ausgeführt werden müssen; also in einem erheblichen Umfange Material eingespart werden kann und sich damit auch Qualitätsverluste durch anfallende Kopiervorgänge vermeiden lassen. Die Vorgehensweise ist zudem umweltfreundlich, d.h. keine weitreichenden Entsorgungsfragen in Sachen Reproduktionsmaterialien und damit verbundenen Mengen an chemischen Lösungen treten auf, siehe BRUNNER (1995). Damit ist gleichzeitig auch ein Energiespareffekt verbunden und der Arbeitsplatz wird insgesamt sauberer und sicherer hinsichtlich seiner Belastung durch gesundheitsgefährdende Stoffe. Natürlich ist damit auch, und das ist nicht zu übersehen, ein Rationalisierungseffekt mit gegeben, der den Umfang an bislang noch erforderlichen Arbeitsplätzen überflüssig macht, die noch durch die Reproduktionstechnologie in der konventionellen Kartenherstellung bedingt waren.

⁸ RIP: Raster Image Processor = Softwarepaket, das Ausgabedateien parametergesteuert für die Belichtung aufbereitet und ausgibt.

Die mit der neuen Technik erzeugten Kartenwerke werden eine gleichbleibende hohe inhaltliche, graphische und technische Qualität aufweisen. Doch werden die auszuführenden kartographischen Feinarbeiten - auch am modernen Bildschirmarbeitsplatz - weiterhin dem fachlichen Wissen, dem Erfahrungsschatz und dem Können jedes einzelnen Kartographen überlassen bleiben. Der Vorteil der digitalen Arbeitsmethodiken liegt eigentlich nicht so sehr in der schnelleren Neuherstellung von Kartenwerken und auch nicht in der schnelleren Nachführung/Aktualisierung bestehender Daten, sondern in der gegebenen Flexibilität bei der Entwurfserstellung, der unkomplizierten Ausführung von Korrekturen bzw. Berichtigungen und einer möglichen Ableitung von Folgeerzeugnissen. In der gegebenen Systemlösung sind einige Generalisierungsfunktionalitäten vorhanden, die jedoch bislang noch nicht praktisch auf die Ableitung eines Folgemaßstabes, z.B. 1 : 25 000 oder 1 : 50 000, angewendet wurden. Dies wird eine der weiteren Aufgaben sein, die im Rahmen des Verfahrensablaufes untersucht werden wird. Auch sind die Generalisierungsfunktionalitäten noch nicht umfassend programmtechnisch realisiert. Inwieweit dies möglich werden wird, ist entwicklungstechnisch noch nicht absehbar. Es fehlen dazu noch grundsätzliche Regeln für die rechnergestützte Generalisierung, die sich in die DV-Welt implementieren lassen. Einzelne thematisch bezogene Lösungen existieren zwar, aber die Bündelung von diesen und den dabei auftretenden Wechselwirkungen wird noch ein weites Entwicklungs- und Untersuchungsfeld darstellen. Somit wird es, was den Bereich der Generalisierung insgesamt betrifft, auch weiterhin auf die qualitativen Fähigkeiten des Kartographen ankommen, die dieser als interaktive Eingriffe am Bildschirmarbeitsplatz vornehmen wird.

Für die digitale Kartographie des Thüringer Landesvermessungsamtes werden sich in den kommenden Arbeiten die nachstehenden Schwerpunkte abbilden, die zunächst mit der Übernahme von Geobasisdaten aus dem ATKIS in die Hard- und Softwareumgebung umschrieben sind. Das Ziel, auf der Grundlage der übernommenen Geobasisdaten Topographische Karten abzuleiten, wobei die noch fehlenden kartographischen Informationen aus den gegebenen analogen bzw. schon geschaffenen digitalen Karten ergänzt bzw. hinzugefügt werden, ist eines der herausragenden Bestrebungen der TKVV. Dieses wird insgesamt zu einem modifizierten Verfahrensablauf führen. Weiterhin wird sich in den Aufgaben der Schwerpunkt abbilden, die Folgemaßstäbe herstellen bzw. ableiten zu wollen einschließlich einer Fortführungstechnologie. Um dieses Aufgabenspektrum angehen zu können, werden in den kommenden Jahren noch Investitionen zu tätigen sein, welche die bestehende Grundausrüstung ergänzen sowie noch einiges an Entwicklungsarbeiten zu leisten sein, um die Softwarelösung um weitere Funktionalitäten zu vervollkommen.

6 Literatur

- HURNI, L., CHRISTINAT, R.: *Anforderungen an ein modernes digitales Produktionssystem*
Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Nr. 9, 1996, S. 473 - 481
- HURNI, L.: *Modellhafte Arbeitsabläufe zur digitalen Erstellung von topographischen und geologischen Karten und dreidimensionalen Visualisierungen*
Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Nr. 4, 1995, S. 278 - 283
- BRUNNER, Kurt: *Digitale Bearbeitung von Karten auf der Basis analoger Grundlagen - Prinzip und Anwendung*
Mitteilungsblatt des Deutschen Vereins für Vermessungswesen Landesverein Rheinland-Pfalz in Zusammenarbeit mit dem Landesverein Saarland e.V., Heft 1/1995, 44. JG, Mainz, 1995, S. 9 - 23
- CHRIST, F.: *Kartographische Systeme für die automatische Kartenproduktion, Geoinformationsverarbeitung und elektronische Präsentation von Karten und Geoinformationen*
Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, Band 8, S. 172 - 181
- SCHILCHER, M.: *Kartographie und Geoinformationssysteme auf dem Weg in die Informationsgesellschaft*
Kartographische Nachrichten, Heft 4, 47. JG, 1997, S. 127 - 137

KELNHOFER, F.: *Geographische Informationssysteme - in Zukunft auch ein Ersatz für die Kartographie ?*

Vermessungswesen und Raumordnung, Heft 3, 1997, S. 141 - 157

GRÜNREICH, D.: *Stand der Forschung und Entwicklung in der digitalen Kartographie - ein Überblick*
Kartographische Schriften, Band 1: Kartographie und Geo-Informationssysteme, 1993, S. 10 - 18

GABRIEL, S., v.d.HEYDE, K.: *Rasterdatenverarbeitung beim Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz*
Nachrichtenblatt der Vermessungs- und Katasterverwaltung Rheinland-Pfalz, Heft 2, 37. JG, 1994, S. 92 - 106

Konzeption Digitale Kartographie

Thüringer Landesvermessungsamt, 1997, unveröffentlicht

MAPSYS: *Computergestützte Bearbeitung der topographischen Karten beim Landesvermessungsamt
Thüringen, Fassung vom 19.12.1994 mit Ergänzungen vom
28.06.1995*

MapSys GmbH, Karlsruhe, unveröffentlicht

MAPTECH: *MapTech-Capturing-System, MapTech-Mapping-System, Firmenprospekte, Systemdo-
kumentation*

Firma MapTech AG

DATUMSOPTIMALE DATENVERARBEITUNG IN DER NETZAUSGLEICHUNG

Rainer Kelm

Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Marshallplatz 8, D-80539 München

Zusammenfassung

Zur Realisierung geodätischer Referenzsysteme sind heutzutage große Datenmengen quasi im On-Line-Modus zu verarbeiten. Allein schon aus logistischen Gründen ist eine Ausgleichung in einem Guß mit allen Originaldaten an einem einzigen Analysezentrum nicht durchzuführen. Praktikabel erweist sich die Methode, geeignete Vorverarbeitungen der Daten vom lokalen bis zum globalen räumlichen und zeitlichen Bereich zu bewerkstelligen. Hierbei sind die Schnittstellen zwischen den vorverarbeiteten Produkten eindeutig zu definieren. Vor allem Datumsfragen sind zu berücksichtigen.

Das hier vorgestellte Konzept erzeugt durch Vorausgleichungen wohldefinierte Lösungsmengen, die datumsoptimal im Sinne einer Vorwärtsstrategie miteinander verknüpft werden. Um den variantenreichen Ablauf solch einer Datenverarbeitung (ständig Übergänge von der Ausgleichung zum Testen und Analysieren) programmiertechnisch günstig zu bewältigen, bietet es sich an, die objektorientierte Programmierung anzuwenden. Anhand eines lokalen dreidimensionalen Netzes wird dieses Verfahren erläutert.

1 Einführung

Als geodätische Referenzsysteme werden die zwei Systeme bezeichnet, welche die wesentliche Referenz zur Ausgleichung globaler geodätischer Netze geben: das raumfeste zälestische Referenzsystem (ICRS) und das erdfeste terrestrische Referenzsystem (ITRS). Beide sind in den Konventionen des Internationalen Erdrotationsdienstes IERS - McCARTHY(1996)- definiert.

Zur Realisierung dieser zwei geodätischen Referenzsysteme benötigt man heutzutage an erster Stelle Messungswerte aus geodätischen Raumverfahren, wie sie z.B. Satelliten- und VLBI - Meßsysteme liefern. Hierbei fallen auf jeder Messungsstation große Datenmengen permanent oder epochenweise an. Hinzu kommen alle geodätischen Messungen, welche die lokale Lage und Bewegung einer Station in bezug zu der Erdoberfläche und des Erdschwerefeldes in der Umgebung oder den relativen Bezug zwischen mehreren Meßinstrumenten bestimmen sollen.

Von der Ausgleichungstheorie her wäre es konsequent, alle anfallenden Messungsdaten in einem Guß an einem einzigen Analysezentrum auszugleichen. Doch diese Maßnahme läßt sich in der Praxis allein schon aus zeitlichen und logistischen Gründen nicht verwirklichen. Ein weiterer wichtiger Grund, nicht so vorzugehen, wäre das Fehlen der lokalen Fehleranalyse. Denn je früher sich Unstimmigkeiten in den Messungsdaten zeigen, desto wahrscheinlicher ist das Auffinden ihrer Ursachen.

Hier beleuchten wir ein Konzept näher, das KELM (1995) aus der Sicht der Design- und Schätzungstheorie für die dynamische Modellierung vorgeschlagen hat. Dieses Konzept beruht darauf, möglichst frühzeitig mit der Ausgleichung und Fehleranalyse von geodätischen Messungen zu beginnen. Die so gewonnenen Ausgleichungsergebnisse sollen dann auf einer höheren Ausgleichungs- und Analyseebene unverändert übernommen werden, solange bis das gewünschte Endergebnis erreicht ist. Da man sich stetig vorwärts von einer Stufe zu anderen bewegt, wird diese Vorgehensweise als Vorwärtsstrategie bezeichnet. Dieser Ansatz vermeidet, auf Datensätze früherer Stufen zurückzugreifen. Inwiefern dabei das geodätische Datum optimal definiert ist, wird im weiteren näher erläutert und anhand eines lokalen terrestrischen Netzes ausführlich dargestellt.

2 Geodätische Referenz und das Datum

Die geodätische Referenz stellt den Bezug zwischen Messungs- und Berechnungsgrößen her, die in der geodätischen Modellierung als Parameter vorkommen.

2.1 Das Referenzsystem

Wenn der geodätischen Referenz ein Koordinatensystem zugrunde liegt, dessen Ursprung, Orientierung und Maßstab zu jedem Zeitpunkt wohldefiniert ist, so sprechen wir hier von einem Referenzsystem. Für die globale Modellierung sind die zwei schon erwähnten geodätischen Referenzsysteme -GEOD-RS in Abb.1- definiert: das ICRS und das ITRS. Auf die Definition von GEOD-RS wird hier nicht eingegangen, da sie für diese Abhandlung nicht von Bedeutung ist. Zahlreiche Literaturverweise dazu sind z.B. in McCARTHY (1996) enthalten.

Es interessiert vielmehr: Welche geodätischen Messungen steuern in welcher Weise zur Realisierung der GEOD-RS bei? Sobald ein Referenzsystem mit geodätischen Messungen realisiert ist, hat sich im englischsprachigen Bereich der Begriff "frame" (Rahmen) statt "system" (System) eingebürgert. Hier wird "reference frame" mit "realisiertem Referenzsystem" übersetzt.

An erster Stelle stehen die VLBI- und Satellitenbeobachtungen, wie z.B. Satellitenlaserstrecken (SLR)- oder Global Positioning System (GPS) - Messungen. Jedem dieser Messungstypen läßt sich wiederum ein eigenes Referenzsystem zuordnen, das jedes für sich spezifischer Definitionen bedarf. Die IERS -

Publikationen gehen darauf ausführlich ein, wie z.B. die Veröffentlichungen in REIGBER (1997), IERS (1997). Solche Messungen erfolgen auf Stationen, die sich für diese Aufgabenstellung eignen und die meist permanent im Meßbetrieb sind. Sie werden hier Fundamentalstationen genannt.

An weiterer Stelle fließen auch hochgenaue lokale terrestrische Messungen oder abgeleitete Messungen nach dem Differentiellen GPS Verfahren (DGPS) in die Realisierung von GEOD-RF ein. Das ist stets dann der Fall, wenn auf derselben Fundamentalstation mehrere Meßsysteme wie SLR, VLBI und GPS gleichzeitig in Betrieb sind. Die Verbindung mehrerer Meßsysteme wird dann epochenweise durch terrestrische oder DGPS - Messungskampagnen hergestellt. Diese Messungstypen haben einen Bezug zur topographischen Erdoberfläche und gehören damit zum topographischen Referenzsystem (TOP-RS in Abb.1). DGPS - Messungen erhalten zusätzlich noch Informationen aus dem GPS-RS.

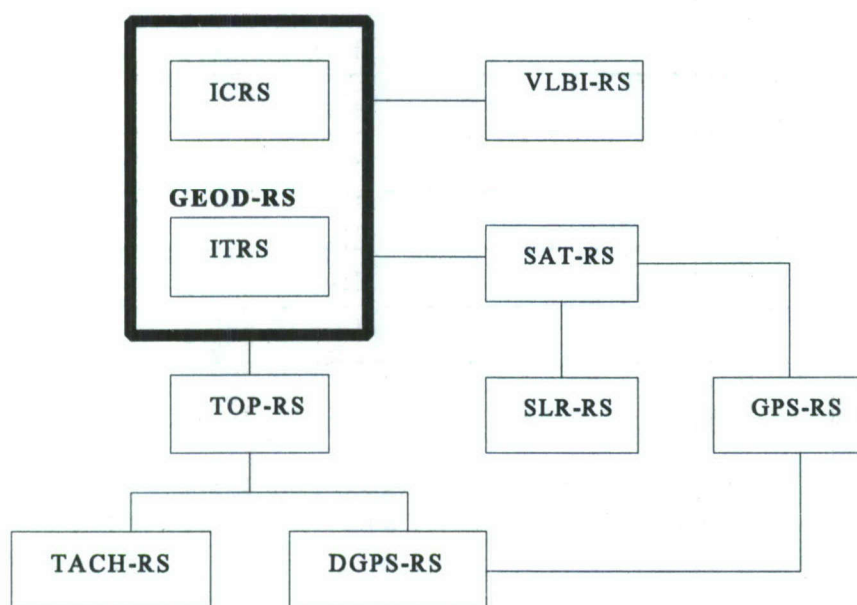


Abbildung 1: Beispiele von Referenzsystemen

In unserem Beispiel des lokalen terrestrischen Netzes sollen die erwähnten hochgenauen terrestrischen Messungen von demselben Präzisionstachymeter stammen. Weiterhin setzt man voraus, daß die Kalibrierungswerte des Tachymeters während der Messungsepoche konstant bleiben. Dann ist es sinnvoll, für diese Messungen ein eigenes Referenzsystem zu definieren, das hier tachymetrisches Referenzsystem (TACH-RS in Abb.1) genannt wird.

2.2 Das Datum eines Referenzsystems

Was ist in einem Referenzsystem zu definieren? Zu einem wohldefinierten geodätischen Modell ist der Ursprung, die Orientierung und der Maßstab des zugrundeliegenden Koordinatensystems zu jedem beliebigen Zeitpunkt zu definieren. Damit ist das Datum des Referenzsystems festgelegt. Als Datumparameter bezeichnen wir somit den Maßstab, die Orientierungswinkel und die Ursprungskoordinaten in bezug zu dem zugrundeliegenden geodätischen Modell, dem Datummodell.

Im Beispiel das TACH-RS überschreite die maximale Ausdehnung des Messungsgebietes nicht einen Kilometer. Das trifft in der Regel für Fundamentalstationen mit mehreren Meßsystemen zu. Dann ist es erlaubt, folgende Hypothese vorzusetzen: Die tatsächlichen Lotrichtungen sind durch die ellipsoidischen Lotrichtungen eines lokalen ellipsoidischen Modells genügend genau approximiert - s.

z.B. DETANG (1997) und KLEIN (1997)-. Ein lokales Ellipsoid ist z.B. das Bessel - Ellipsoid, das den Bezug für das Deutsche Hauptdreiecksnetz darstellt. Anhand dieses Datummodells lassen sich die Datumparameter des TACH-RS definieren: Der Maßstab ist durch die gemessenen Distanzen des kalibrierten Tachymetergerätes gegeben. Die Ost- und Nordkomponenten der Orientierung in Lotrichtung (hier: Ellipsoidnormalenrichtung) ist durch das Datummodell festgelegt, aber die azimutale Orientierung ist aufgrund der geringen Ausdehnung des Messungsgebietes frei. Die drei Komponenten des Ursprungs des Koordinatensystem sind durch die Tachymetermessungen nicht festzulegen, sie sind freie Translationsparameter. Die Informationen über das Datum des TACH-RS sind in Tab.1 zusammengefaßt.

Datum des TACH-RS		
Datummodell:	3D lokal - ellipsoidisch	
Datumparameter	Anzahl	fest oder frei
Ursprungskomponenten	3	frei
Orientierung in Lotrichtung	2	fest
azimutale Orientierung	1	frei
Maßstab	1	fest
Referenzzeitpunkt:	t	

Tabelle 1: Datum des tachymetrischen Referenzsystems

In der letzten Reihe der Tab.1 ist schließlich der Zeitpunkt angegeben, für den das Datum gilt. Im Datummodell wird noch die Hypothese aufgenommen: Während der Meßepoche bleiben die Datumparameter konstant.

2.3 Datum des Messungstyps

Für das weitere Vorgehen ist es sinnvoll, den Begriff "Datum des Messungstyps" einzuführen. Beim Tachymeter z.B. gibt es drei Messungstypen: die räumliche Distanz, die Horizontalrichtung und die

Datum der Messungstypen von TACH-RS				
Messungstyp	Datumparameter	Anzahl	Datums-information	Datums-defekt
räumliche Distanz	Maßstab	1	voll	0
Horizontalrichtung pro Satz	azimutale Orientierung	1	null	1
Zenitdistanz	Orientierung in Lotrichtung	2	null	0

Tabelle 2: Datum von Messungstypen

Zenitdistanz. Jedem Typ sind Datumparameter zuzuweisen und anzugeben, ob diese Parameter durch

diesen Messungstyp bestimmbar sind oder sein sollen.

Aus Tab.2 ist zu erkennen, daß die räumliche Distanz den Maßstab bestimmt. Damit erzeugen die räumlichen Distanzen keinen Rangdefekt in der zugehörigen Normalgleichungsmatrix z. B. nach dem Gauß-Markov-Modell. Dagegen enthalten die Horizontalrichtungen je Satz keine Information über die azimutale Orientierung. Das führt zu einem Rangdefekt von eins pro Satz im Normalgleichungssystem. Die Zenitdistanzmessung ist aufgrund des gewählten Datummodells in seiner Orientierung festgelegt und erzeugt keinen Rangdefekt

3 Datumsoptimale Vorwärtsstrategie

Soweit sind nun die Vorbereitungen getroffen, um auf das Konzept der datumsoptimalen Vorwärtsstrategie ausführlich einzugehen.

3.1 Konzept der Vorwärtsstrategie

Die Grundidee dieses Konzepts hat KELM (1995, S.111 ff) unter Einbeziehung der vertikalen Dimension dargestellt. Hier wird das Konzept näher beleuchtet und konkret am Beispiel des lokalen terrestrischen Netzes entwickelt.

Die Grundidee zur Vorwärtsstrategie ist sehr einfach und in Abb.2 schematisch dargestellt: Zu irgendeinem Zeitpunkt t_1 sei eine Messungseinheit ME1 gegeben. Unter Messungseinheit sei ein Satz von Messungen verstanden, der in sich aufgrund von Analysekr iterien eine Analyseeinheit bildet. Solch eine Messungseinheit ist z.B. die Satzmessung von Horizontalrichtungen im Hin- und Rückgang .Das Analysekr iterium lautet hier z.B.: Untersuche die Satzmessungen auf Ziel- und Kippachsenfehler durch Vergleich der Messungen von Hin- und Rückgang und bilde einen vorausgeglichene n Satz durch Mittelbildung. Nach erfolgreicher Analyse AK1 erhält man somit den vorausgeglichene n Messungssatz VE1.

Zum Zeitpunkt $t_2 \geq t_1$ sei eine weitere Messungseinheit ME2 gegeben. Sie sei z.B. der nächste Satz von gemessene n Horizontalrichtungen auf demselbe n Standpunkt. Nach schon beschriebene r Analyse - hier jetzt AK2 - gelange n wir zum vorausgeglichene n Messungssatz VE2. Die zwei vorausgeglichene n Horizontalrichtungssätze sind nun zu analysieren und ausgleichungstechnisch zusammenzufasse n. Das ergibt den vorausgeglichene n Messungssatz VE12.

Auf ähnliche Weise seien z.B. die gemessene n Distanzen und Zenitdistanzen vorausgeglichene n worden, also für $t_3 \geq t_2$ komme n man von ME3 über AK3 nach VE3.

In Abb. 2 folgt schematisch als nächste s die Analyse und gemeinsame Vorausgleiche n der vorausgeglichene n Messungseinheiten VE12 und VE3 nach dem Analysekr iterium AK123. Es kö nnte in dem Beispiel bedeute n, daß aus den vorausgeglichene n Tachymetermessunge n, die an demselbe n Tag gewonne n sind, in eine r vorläufige n Ausgleichung zum Analyse zweck Koordinate n bezüglich des Tachymeterreferenzsystems berechne t werde n. Schließlich solle n mit der Messungseinheit ME4, de n Analysekr iterien AK4 und der Vorausgleiche nseinheit VE4 alle weitere n Vorausgleiche nunge n gemeint sein, die nötig sind, um mit der gemeinsame n Ausgleichung von VE123 und VE4 gemäß der Analysekr iterien AKE zur endgültige n Lösungseinheit LE zu gelange n.

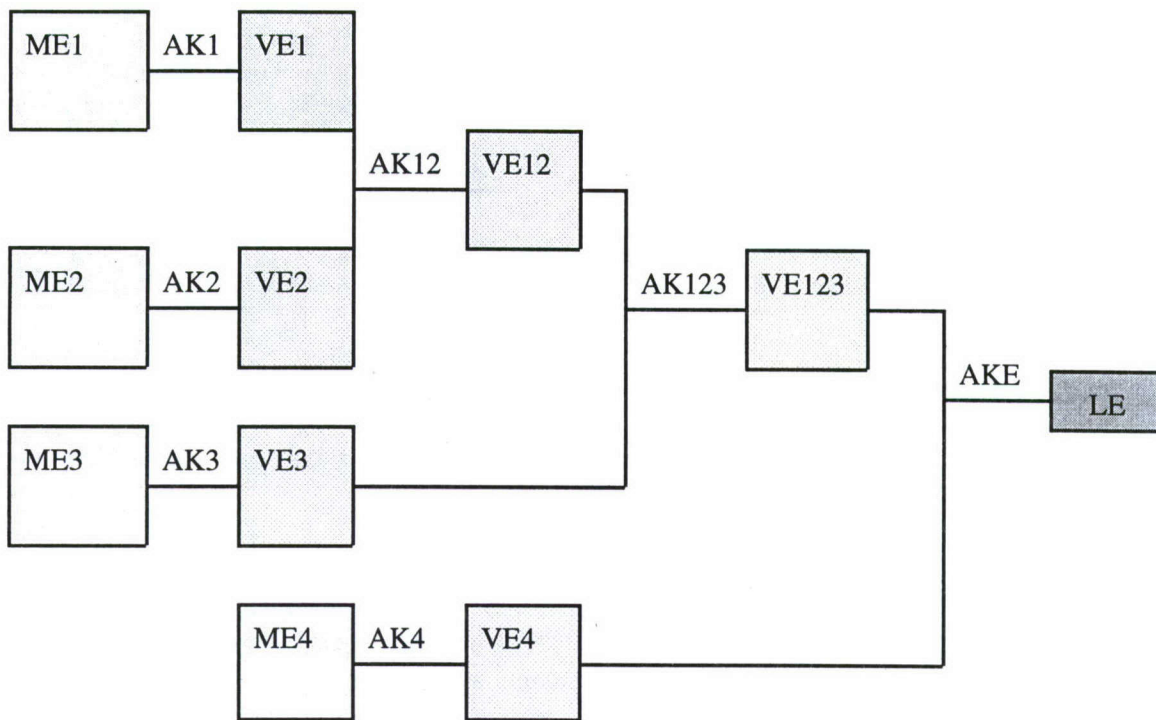


Abbildung 2: Schema Vorwärtsstrategie

Vorwärtsstrategie heißt also, von der untersten Messungseinheit bis zur endgültigen Lösung stufenweise Analysen und Vorausgleichungen nach Analyseketten so durchzuführen, daß nicht mehr auf Messungs- und Dateninformationen zurückgegriffen werden muß, die schon verarbeitet worden sind.

3.2 Leitgedanke

Bei diesem Vorgehen ist es sinnvoll, folgenden Leitgedanken zu beachten: Die Schätzungsergebnisse der Lösungseinheit nach der Methode der Vorwärtsstrategie sollen signifikant gleich sein mit den Schätzungsergebnissen, die man erhielte, wenn alle Messungen in einem Guß nach einem einheitlichen geodätischen Modell ausgeglichen worden wären.

Auch das sei anhand des TACH-RS beispielhaft erläutert. Zu den Kriterien für ein einheitliches geodätisches Modell zur Realisierung von GEOD-RF gehört, daß sich die Modellierung auf Koordinatensysteme bezieht, die einen eindeutigen Bezug zum Geozentrum haben. Könnte man nun davon ausgehen, alle Messungen in einem Guß auszugleichen, läge dieser Ausgleichung ein einziges Modell zugrunde, das sich auf das Geozentrum bezieht. Nach der Vorwärtsstrategie ist es kaum möglich, in den Anfangsstufen schon auf den Bezug zum Geozentrum im strengen Sinn zu achten. Z.B. kann man für das TACH-RS ein lokales Ellipsoid als Datummodell wählen, weil es sich am besten den örtlichen Verhältnissen anpaßt. Ein Bezug auf das Geozentrum wäre nur dann möglich, wenn für das Messungsgebiet genügend genaue Lotabweichungswerte in Bezug auf das geozentrische Modell bekannt wären.

Hier greift nun das Begriffspaar "signifikant gleich" im Leitgedanken. Die Schätzungsergebnisse, die nach der Ausgleichung in einem Guß zu erwarten sind, basieren auf einem idealen Ansatz: die Abweichungen zwischen den gemessenen und den nach dem geodätischen Modell berechneten Beobachtungswerten seien nur rein stochastischer Natur im Sinne des weißen Rauschens. Wenn man nach demselben Ansatz die Vorwärtsstrategie anwendet, so wäre zu fordern, daß die Schätzungsergebnisse gleich im Sinne von numerisch identisch sind. Diese in der Praxis nicht realisierbare Gleichheit wird im Leitgedanken dahingehend abgeschwächt: Durch Einführen von kompatiblen deterministischen und stochastischen Modellen - kompatibel zu dem einheitlichen

geodätischen Modell - dürfen die Schätzungsergebnisse nicht signifikant von denen des idealen Falles abweichen. Durch geeignete Kriterien ist festzulegen, wie "signifikant gleich" zu erreichen ist. Die Faustregel hierzu lautet: Die Abweichungen sollten nur stochastisch bedingt sein und im Mittel ein vorgegebenes Ungenauigkeitsmaß nicht überschreiten. Anders ausgedrückt: Die Approximation des einheitlichen geodätischen Modells durch kompatible Modelle soll keine grobe oder systematische Abweichungen im Schätzungsergebnis erzeugen, und die Abweichungen von den idealen Werten dürfen im statistischen Sinn ein gewisses Genauigkeitsmaß nicht unterschreiten.

Es kommt nun auf das konkrete Ausformulieren dieser geeigneten Kriterien an. Das hängt größtenteils von dem Referenzsystem und den Messungstypen ab, für die kompatible Modelle zu entwerfen sind. Hierauf sei im weiteren am Beispiel des lokalen terrestrischen Netzes ausführlich eingegangen.

3.3 Optimales Datum

Eine wesentliche Rolle zum Entwerfen geeigneter Signifikanzkriterien im Sinne des Leitgedankens spielt das Datum, so wie es hier beschrieben worden ist. Es sei hier am Beispiel des Datumparameters Maßstab erläutert. Entsprechendes gilt auch für die Datumparameter "Orientierung" und "Ursprung".

Nach dem Idealfall des einheitlichen geodätischen Modells ist für die GEOD-RF der Maßstab durch den zeitkonstanten Lichtgeschwindigkeitsparameter definiert, der auf Raummessungen zutrifft. Wenn ein Messungstyp, wie z.B. die räumliche terrestrische Distanz, eine Datuminformation des Maßstabes enthält, so verfügt der ausgeglichene Messungstyp über den Maßstab, der durch den Lichtgeschwindigkeitsparameter gegeben ist. In der Vorwärtsstrategie ist in den unteren Messungs- und Vorausgleichungseinheiten dieser Lichtgeschwindigkeitsparameter nicht definiert. Wenn man jedoch durch geeignete Maßnahmen dafür sorgt, daß der interne Maßstab über die terrestrischen Distanzen solange konstant bleibt, bis in einer höheren Stufe eine andersartige Maßstabsinformation zu verarbeiten ist, so kann ein Maßstabsübergang vollzogen werden, ohne daß systematische Fehler auftreten. Anders sieht es jedoch aus, wenn man in den unteren Stufen das Maßstabsverhalten der terrestrischen Distanzen nicht überwacht. Dann kann sich ein systematischer Maßstabsfehler bis zur obersten Ausgleichungsstufe fortpflanzen. Der Leitgedanke wäre nicht berücksichtigt. Die Konstanz der internen Datumparameter in der Vorwärtsstrategie zu überwachen, ist ein Kennzeichen des optimalen Datums.

Ein weiteres Merkmal des optimalen Datums ist: Es ist dasjenige Datum zu wählen, das die wenigsten Fremdinformationen in der Ausgleichung benötigt. Anhand des Messungstyps "Horizontalrichtungen" sei es erklärt.

Bei Horizontalrichtungen ist für jeden Standpunkt und für jede neue Anfangsrichtung in der üblichen Ausgleichung nach dem Gauß-Markov-Modell eine Orientierungsunbekannte einzuführen. Deswegen besitzt dieser Messungstyp nach Tab.2 einen Datumsdefekt von 1. Für die a priori Berechnung der Orientierungsunbekannten benötigt man die Kenntnis der genäherten Koordinaten der Zielpunkte, zu denen Anfangsrichtungen gemessen sind. Innerhalb der Vorwärtsstrategie kann es aber vorkommen, daß Analysen und Vorausgleichungen in der Messungseinheit der Horizontalrichtungen sinnvoll sind, jedoch noch keine Näherungskordinaten der entsprechenden Zielpunkte vorliegen. Hier führt das zweite Merkmal des optimalen Datums zum Ziel: Reduziere den Datumsdefekt durch geeignete Transformationen. Im Beispiel heißt das: Transformiere einen Satz von Horizontalrichtungen in einen Satz von Horizontalwinkeln durch Differenzbildung z.B. zur Anfangsrichtung.

Dadurch erhält man aus n Horizontalrichtungen n-1 Horizontalwinkel. Der Vorteil liegt darin, daß man jegliche Art von Analyse und Ausgleichung mit dem Messungstyp Horizontalwinkel durchführen kann, ohne Fremdinformationen einführen zu müssen. Denn der Horizontalwinkel ist von keinem Datumparameter berührt und erzeugt somit auch keinen Rangdefekt (s. Tab.3).

Datum der Messungstypen von TACH-RS				
Messungstyp	Datumsparameter	Anzahl	Datums-information	Datums-defekt
Horizontalwinkel	null	1	null	0

Tabelle 3: Datum des Horizontalwinkels

3.4 Objektorientiertes Entwerfen und Programmieren

Ein weiteres Kennzeichen der Vorwärtsstrategie ist, daß an verschiedenen Orten zur gleichen Zeit oder auch am gleichen Ort zu verschiedenen Zeiten in kleinen begrenzten Einheiten analysiert und ausgeglichen werden kann. Hinzu kommt, daß viele Analyse- und Ausgleichungsschritte gleich oder ähnlich sind.

Für das Entwickeln und Programmieren einer geeigneten Software für die Vorwärtsstrategie ist allein schon aus dem oben beschriebenen Kennzeichen zu folgern, daß die Software flexibel und möglichst plattformunabhängig sein sollte. Es wäre heutzutage sogar vorstellbar, die Software weltweit über Internet abrufen oder sogar im WorldWideWeb (WWW) unmittelbar berechnen zu können.

Die Softwareentwicklung geht in diese Richtung und benutzt dazu fast ausschließlich das objektorientierte Entwerfen und Programmieren. Auch im geodätischen Bereich ist es heutzutage schon möglich, geodätische Objekte wie z.B. Koordinatentransformationen mit Hilfe der JAVA - Programmiersprache direkt im WWW zu berechnen - s. z.B. EGGER(1997) -.

Ziel dieser Arbeit ist es nicht, auf das objektorientierte Programmieren innerhalb der Vorwärtsstrategie einzugehen. Es soll hier nur darauf hingewiesen werden, daß in dieser Programmieretechnik die Software für die Vorwärtsstrategie entwickelt werden soll. Zur Zeit verwenden wir hierzu die plattformunabhängige objektorientierte Skriptsprache Perl 5 - s. z.B. WALL (1996) - und eine plattformunabhängige Version F der Programmiersprache Fortran 90 - IMAGINE1(1998)-für komplexe numerische Berechnungen..

4 Beispiel: Lokales terrestrisches Netz

Anhand eines lokalen terrestrischen Netzes wird im folgenden die datumsoptimale Vorwärtsstrategie konkretisiert. Dabei sollen sich die Messungen mit einem elektronischem Tachymeter auf ein Meßgebiet von höchstens einem Kilometer Durchmesser beschränken. Die Meßkampagne soll nicht länger als eine Woche dauern.

Nach dem Schema der Abb.1 liegt den Messungen somit ein tachymetrisches Referenzsystem TACH-RS zugrunde. Ziel der Vorwärtsstrategie ist es darin, im Datumsmodell des lokalen Ellipsoids mit den Messungstypen räumliche Distanzen (d), Zenitdistanzen (z) und Horizontalrichtungen (r) dreidimensionale Koordinaten im Datumsmodell zu schätzen. Die Schätzungsergebnisse können z.B. dazu dienen, die dreidimensionale relative Lage mehrerer permanenter Meßgeräte zu einem bestimmten Referenzzeitpunkt t zu kennzeichnen. Um diese Koordinaten auch für die weitere Verarbeitung zur Realisierung geodätischer Referenzsysteme datumsoptimal nutzen zu können, ist das Datum dieses realisierten TACH-RS genau zu beschreiben.

Die Vorwärtsstrategie erfolgt in drei zeitlich nacheinander folgenden Abschnitten: Vor der ersten Messung, während der Messungskampagne und nach der letzten Messung.

4.1 Vor der ersten Messung

Die Tätigkeiten vor der ersten Messung sind schematisch in Abb.3 beschrieben.

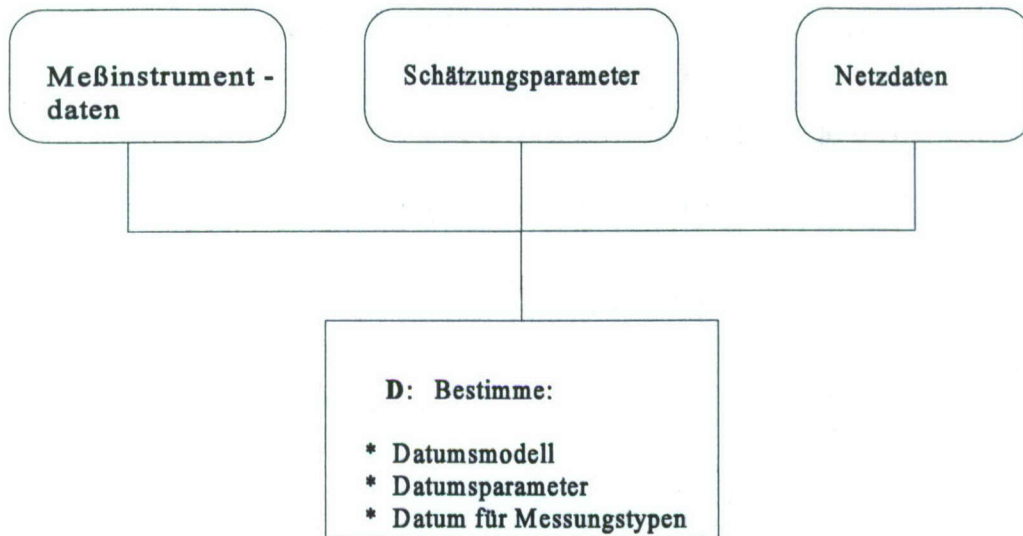


Abbildung 3: Vor der ersten Messung

In der Datei "Meßinstrumentdaten" sind die Kalibrierungswerte der Messungstypen d, z und r gegeben. Die Datei "Schätzungsparameter" nimmt die Informationen über die gewünschte Art der Schätzungsparameter für die Lösungseinheit auf. Hier wären es ausgeglichene dreidimensionale Koordinaten und ihre volle Kovarianzmatrix. Weitere Schätzgrößen wie z.B. Refraktionskoeffizienten werden intern berechnet, um sie für Analysen zu benutzen. In der Datei "Netzdaten" sind Informationen über die Ausdehnung, Höhenstruktur und Koordinatennäherungswerte von mindestens zwei Netzknoten gegeben. Außerdem sind hier die Informationen über das lokale Schwerfeld wie z.B. Lotabweichungen oder Geoidundulationen einzugeben.

Mit diesen Informationen bestimmt man über geeignete Kriterien das optimale Datummodell. In der Beschreibung dieses Modells sind auch die Hypothesen anzugeben, die diesem Modell zugrunde liegen. Z.B. beim Fehlen von Schwerfeldinformationen gilt nach einer erfolgreichen Simulationsanalyse die Hypothese: Aufgrund der geringen Meßgebietsausdehnung von maximal einem Kilometer und der geringen Höhenunterschiede im Meßgebiet lassen sich die Lotrichtungen als ellipsoidische Normalrichtungen approximieren. Es kann eine konstante Kippung der lokalen Ellipsoidoberfläche vorhanden sein. Diese Hypothese hat dann Konsequenzen für das externe Datum des realisierten Referenzsystems, auf das noch eingegangen wird.

Die Datumparameter für das TACH-RS sind nach Tab.1 festgelegt. In der Regel werden die drei freien Ursprungs Komponenten durch die drei Initialkoordinaten des ersten Netzpunktes in der Netzdatendatei festgelegt. Eine der zwei genäherten Horizontalkoordinaten des zweiten Netzpunktes bestimmt die freie azimutale Orientierung. Natürlich können auch andere Entscheidungskriterien für die Festlegung der freien Datumparameter ausgewählt werden. Sie sind allerdings nur datumsoptimal, wenn gerade eindeutig die freien Parameter erfaßt werden.

Das Datum für die Messungstypen im TACH-RS bestimmt sich aus Tab. 2.

4.2 Während der Messungskampagne

Hier sei ein Tag als der Zeitraum festgelegt, der zur einer vorausgeglichenen Einheit führen soll.

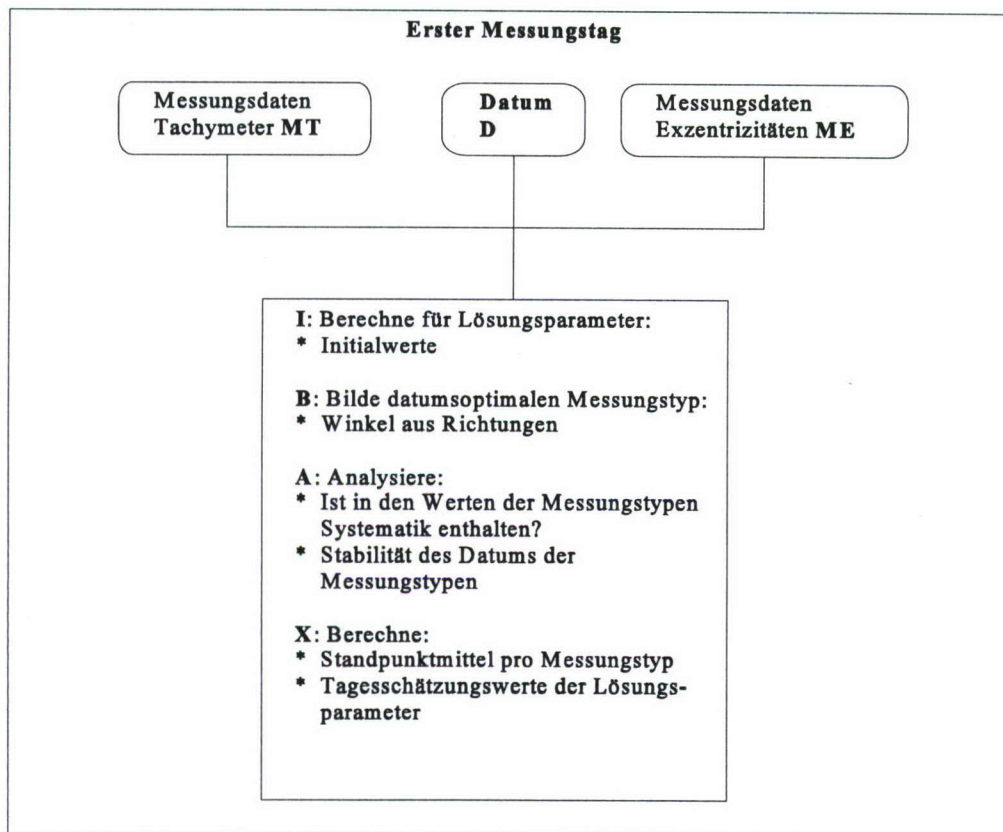


Abbildung 4: Erster Messungstag

Die Analysen und Berechnungen am ersten Messungstag sind aus der Abb. 4 zu erkennen. Aus den schon erwähnten Gründen werden dabei vom Programm her automatisch Winkel aus Richtungen berechnet. Dann entstehen allerdings vollbesetzte Kovarianzmatrizen für Winkel, auch wenn den Richtungen keine Kovarianzen a priori zugeordnet sind. Doch es läßt sich nachweisen, daß diese Kovarianzmatrizen und auch ihre Inversen, die Gewichtsmatrizen, in einfacher Weise analytisch zu berechnen sind. Hierzu ist eine Veröffentlichung in Vorbereitung.

In dem Analyseblock wird nach Systematiken aufgrund von Überbestimmungen gesucht, wobei hier

klassische statistische Tests, wie z.B. in KOCH (1980) oder CASPARY (1994) angegeben, zur Anwendung kommen.

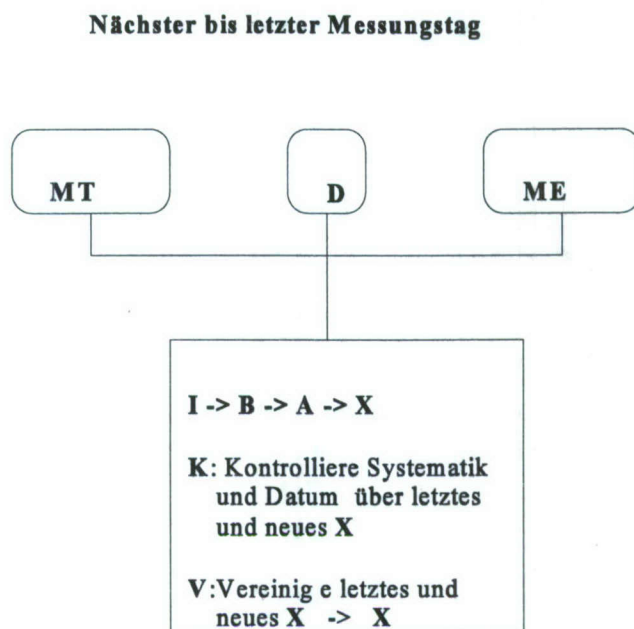


Abbildung 5: Nächster Messungstag

Zum Schluß wird ein erster möglicherweise noch unvollständiger Satz von Lösungsparametern geschätzt, soweit es die Tagesmessungen zulassen. Diese Schätzungen benötigt man für Analysezwecke.

An den weiteren Tagen geht man genauso vor wie am ersten. Nur sind zusätzlich über geeignete Hypothesentests Kontrollen zur Systematik und Datumsstabilität durchzuführen, die auf dem Vergleich der geschätzten Lösungsparameter der letzten zwei Tage beruhen. Anschließend vereinigt man den neuen Lösungsparametersatz mit dem vorhergehenden, wobei im Sinne des Leitgedankens die vollen Kovarianzmatrizen zu berücksichtigen sind. Programmiertechnisch betrachtet, ist es in diesem Referenzsystem wahrscheinlich effizienter, die Lösungsparameter auf der Normalgleichungsebene zu kombinieren..

4.3 Nach der letzten Messung

Am Ende der Messungskampagne werden die geschätzten Lösungsparameter in dem nun realisierten tachymetrischen Referenzsystem präsentiert (s. Abb.6). Dieses Referenzsystem ist durch ein internes und externes Datum charakterisiert. Das interne Datum stimmt mit dem hier eingeführten Datum wie oben beschrieben überein.

Das externe Datum bestimmt sich aus den Hypothesen zum Datumsmodell. Im Beispiel geht man davon aus, daß eine Kippung der lokalen Ellipsoidfläche als systematischer Einfluß vermutet werden kann. Damit werden die Datumsparameter "Orientierungen in Lotrichtung" wegen einer möglichen konstanten Drehung frei. Hinzu kommt, daß der Ursprung und die azimutale Orientierung willkürlich durch Näherungskkoordinaten im internen Datum festgelegt sind. Schließlich ist der Maßstab durch lokale Distanzmessungen gegeben. Diese Hypothesen sind im externen Datum anzugeben. Denn bei weiterer Nutzung dieses realisierten Referenzsystems im Sinne von Abb.1 muß das externe Datum mit dem des übergeordneten Referenzsystems in geeigneter Weise abgeglichen werden. Das geschieht mit Methoden der Datumstranformation, wie sie z.B. in OSWALD (1992) übersichtlich wiedergegeben sind.

5 Schlußfolgerungen und Ausblick

Realisiertes TACH-RS
Präsentiere: <ul style="list-style-type: none"> * Schätzungswerte der Lösungsparameter * Genauigkeitsmaße zu den Lösungsparametern
Kennzeichne: <ul style="list-style-type: none"> * Internes Datum * Externes Datum

Abbildung 6: Realisiertes tachymetrisches Referenzsystem

Die datumsoptimale Vorwärtsstrategie ist hier mehr oder weniger schematisch auf der untersten Ebene der Referenzsysteme nach Abb. 1 konkretisiert. Der Autor beschäftigt sich zur Zeit hauptsächlich mit Satellitenreferenzsystemen. Dabei stellt er immer wieder fest, daß die größten Widersprüche weniger bei den oft hochpräzisen Satellitendaten auftauchen, sondern bei lokalen geodätischen Schätzungsergebnissen wie z. B. bei den Exzentrizitäten zwischen verschiedenen Meßsystemen auf einer Fundamentalstation. Sie sind in einem lokalen Referenzsystem ähnlich dem hier beschriebenen TACH-RS berechnet. Leider werden oft nur nach Abb.6 die Schätzungswerte der Lösungsparameter, zumeist die dreidimensionalen Koordinatenunterschiede, angegeben. Es fehlen ausführliche Informationen über Genauigkeitsmaße und vor allem über das interne und externe Datum mit Datummodell samt Hypothesen. Gerade diese Angaben wären wichtig, um die Exzentrizitäten im Sinne des Leitgedankens datumsoptimal mit anderen Referenzsystemen zu vereinigen. Denn systematische Verfälschungen auf der unteren Ebene (hier z.B. TACH-RS) führen wegen zu geringer Redundanz zu kaum kontrollierbaren Systematiken auf der oberen Ebene (hier z.B. GEOD-RS nach Abb. 1). Deswegen ist ein sorgfältiges Vorgehen gemäß dem Leitgedanken gerade auf der untersten Ebene so wichtig.

Nach dem Leitgedanken sollen in der Vorwärtsstrategie Schätzungsergebnisse erzielt werden, die denen der hypothetischen Ausgleichung in einem Guß signifikant gleich sind. Dazu ist es notwendig, solche idealen Schätzungsergebnisse und deren Genauigkeiten für die gegebene Netz- und Messungssituation zu ermitteln. Das ist nur mit deterministischen und stochastischen Simulationstechniken möglich. Die Entwicklung solcher Simulationsverfahren bedarf sicherlich noch intensiver Forschungsarbeit.

Der Hauptvorteil der datumsoptimalen Vorwärtsstrategie liegt darin, daß wir nicht ständig auf Originalmessungen zurückgreifen müssen, sondern zu den gewünschten Zeitpunkten vorausgeglichene Einheiten nach Abb.2 verarbeiten. Das ist bei der ständig anfallenden riesigen Datenmenge für die Realisierung der geodätischen Referenzsysteme heute nicht anders möglich. Es setzt nun voraus, daß Standards und Spezifikationen für diese Strategie entwickelt werden, die auch weltweit angewendet werden. Ansätze dazu sind nach REIGBER (1997) im Rahmen des IERS vorgestellt.

Nicht zuletzt bedarf es auch der Umsetzung in eine Software, die einen möglichst automatischen

Datenverarbeitungsfluß gewährleistet. Damit diese Software in den gerade benötigten Einheiten weltweit genutzt wird, sollte sie anwenderfreundlich und plattformunabhängig sein. Hierzu eignet sich vor allem die objektorientierte Programmierung bis hin zu Expertensystemen..

6 Literaturverzeichnis

- Caspary, W., Wichmann, K.: *Lineare Modelle: Algebraische Grundlagen und statistische Anwendungen*
R.Oldenbourg Verlag München Wien, 1994
- Detang, Z.: *Datumsprobleme und stochastische Aspekte beim GPS-Nivellement für lokale Ingenieurnetze*
Schriftenreihe Heft 58, Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, München, 1997
- Egger, D.: *Object-oriented Astronomy, Celestial Mechanics and Geodesy*
<http://alpha.fesg.tu-muenchen.de/dieter/java/methods.html>, 1997
- IERS: *1996 IERS Annual Report*
International Earth Rotation Service (IERS), Paris, 1997
- Imagine1: *F Compiler*
<http://www.imagine1.com/imagine1>, 1998
- Kelm, R.: *The vertical dimension of the European Datum: some principal considerations*
Reports of the Symposium of the IAG Subcommittee for the European Reference Frame (EUREF), Veröffentlichung der Bayerischen Kommission für die internationale Erdmessung, Heft 56, München, 1995
- Klein, U.: *Analyse und Vergleich unterschiedlicher Modelle der dreidimensionalen Geodäsie*
Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 479, München, 1997
- Koch, K.-R.: *Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen*
Dümmler Verlag Bonn, 1980
- McCarthy, D.: *IERS Conventions*
IERS Technical Note 21, Paris, 1996
- Oswald, W.: *Zur kombinierten Ausgleichung heterogener Beobachtungen in hybriden Netzen*
Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, 1992
- Reigber, C. and M. Feissel (eds): *IERS missions, present and future, Report on the 1996 IERS Workshop*
IERS Technical Note 22, Paris, 1997
- Wall, L., Christiansen, T., Schwartz, R.: *Programming Perl 5*
O'Reilly & Associates, Inc., 1996

EINFÜHRUNG UND EINSATZ VON GEOGRAPHISCHEN INFORMATIONSSYSTEMEN IN KLEINKOMMUNEN

Dr.-Ing. Norbert Kersting

Universität GH Essen
Fachbereich 11, Vermessungswesen
Henri-Dunant-Straße 65
45131 Essen

Zusammenfassung

Wie ein GIS in der technischen Verwaltung bei einer kleinen Kommune eingeführt und eingesetzt werden könnte, wird am Beispiel einer Kleinstadt mit ca. 9000 Einwohnern und einer Fläche von 16 Quadratkilometern, von denen 6 Quadratkilometer bebaut sind, gezeigt. Als Grundlage für die Konzeption zur Einführung des GIS wird der Ist-Zustand bezüglich der Bearbeitung, Verwaltung und Nutzung raumbezogener Daten in der Kommunalverwaltung sowie der Austausch dieser Daten mit internen und externen Stellen untersucht. Aus der Erfassung und Bewertung des Ist-Zustandes und aus den Möglichkeiten, die ein GIS über die derzeitige Nutzung raumbezogener Daten hinaus bietet, werden sinnvolle Einsatzgebiete für das GIS in der Kleinkommune abgeleitet. Hinsichtlich der Aufgabenverteilung zeigt sich die Notwendigkeit, nicht nur die Ersterfassung sondern auch die Pflege der Daten überwiegend aus der Verwaltung auszugliedern und einem Fachbüro zu übertragen. Innerhalb der Kommunalverwaltung dient das GIS dann vorwiegend als Auskunftssystem für die tagtägliche Arbeit vor Ort, mit dem Auswertungen und Ausgaben vorgenommen werden. Nach der Festlegung der Aufgaben des GIS wird seine Konfiguration bestimmt sowie ein Zeit- und Kostenplan für seine Einführung entworfen.

1 Einführung

Geographische Informationssysteme (GIS) erfordern bei ihrer Einführung erhebliche Investitionen und müssen gewöhnlich durch speziell geschultes Fachpersonal bedient werden. Im kommunalen Bereich findet man sie daher bisher fast ausnahmslos bei großen und mittleren Städten.

Wie ein GIS in der technischen Verwaltung bei einer kleinen Kommune eingeführt und eingesetzt werden könnte, wird am Beispiel einer Kleinstadt mit ca. 9000 Einwohnern und einer Fläche von 16 Quadratkilometern, von denen 6 Quadratkilometer bebaut sind, gezeigt. Der dargestellte Fall ist im Detail nicht allgemeingültig. Er beschreibt vielmehr die in der Beispielkommune konkret vorgefundene Situation. Die entwickelte Konzeption paßt daher im einzelnen auch nur für die Beispielkommune. Der grundsätzliche Aufgabenbereich und die prinzipiellen Schritte zur Einführung eines kommunalen Geoinformationssystems sind jedoch für fast alle kleineren Kommunen gültig und können auf andere Fälle analog übertragen werden.

Grundlage für die Konzeption zur Einführung des GIS ist der Ist-Zustand bezüglich der Bearbeitung, Verwaltung und Nutzung raumbezogener Daten in der technischen Kommunalverwaltung sowie der Austausch dieser Daten mit internen und externen Stellen, der daher im Detail erhoben werden muß. Aus der Erfassung und Bewertung des Ist-Zustandes und aus den Möglichkeiten, die ein GIS über die derzeitige Nutzung raumbezogener Daten hinaus bietet, sind sinnvolle Einsatzgebiete für das GIS in der Kleinkommune abzuleiten. Die Aufgabenaufteilung beim GIS Aufbau und bei seinem Betrieb zwischen der technischen Kommunalverwaltung und externen Stellen ist für einen nutzbringenden Einsatz von großer Bedeutung. Sie ist daher eingehend zu untersuchen.

Abschließend wird ein Zeit- und Kostenplan für die Einführung des GIS entworfen.

2 Ist-Zustand

Wichtig für die Einführung und auch für den Einsatz des kommunalen GIS ist der Ist-Zustand bezüglich der Bearbeitung und Verwaltung raumbezogener Daten innerhalb der Kommunalverwaltung sowie der interne und externe Austausch dieser Daten. Der Ist-Zustand wird durch Antworten auf folgende Fragen beschrieben:

- Welche raumbezogene Daten liegen vor ?
- Wer verarbeitet diese Daten ?
- Auf welche Art und Weise erfolgt die Verarbeitung ?
- Für welche Aufgabe werden die Daten genutzt ?
- Wer tauscht raumbezogene Daten aus und wie erfolgt der Austausch ?

2.1 Welche raumbezogenen Daten liegen vor ?

Die wichtigen raumbezogenen Daten, die bei der Beispielkommune vorhanden waren, sind in den Tabelle 2.1.1 und 2.1.2 zusammengestellt.

Der digitale Stadtplan ist im Vorgriff auf die Einführung des GIS erstellt worden. Er enthält die Verkehrszüge in generalisierter Form und die wichtigen öffentlichen Gebäude zur Orientierung. Er kann damit schon die Basis für statistische Auswertungen auf der Basis von Baublöcken (von Straßenzügen begrenzt) liefern.

Von den 35 Blättern der amtlichen Flurkarte, die das bebaute Gebiet der Stadt abdecken sind 13 von einem Ingenieurbüro im Auftrag der Stadt digitalisiert worden. Diese Digitalisierungen wurden nach einer sogenannten Homogenisierung mit Hinterlegung amtlicher Koordinaten von der Vermessungsverwaltung als amtliche digitale Flurkarte DFK übernommen. Diese nunmehr amtliche DFK wurde dann von der Kommune übernommen und wiederum durch ein Ingenieurbüro in das von der Stadt

eingesetzte System für die graphische Datenverarbeitung eingespielt. Eine Verbindung der ALB-Daten zu den digitalen graphischen Daten der Flurkarte existiert jedoch noch nicht.

Karten oder Pläne	Fachinhalt	Besonderheit
Stadtplan	Straßen generalisiert und wichtige Gebäude	Analog und digital
35 Kopien der amtliche Flurkarte 1:1000 aus dem bebauten Bereich	Grenzen, Gebäude, Topographie rudimentär	13 auch in digitaler Form
Flächennutzungsplan	Vorbereitende Bauleitplanung	
Bebauungspläne	Verbindliche Bauleitplanung	36 Pläne, davon einer in digitaler Form
Pläne städtischer Grundstücke	farbig angelegte Kopien der Flurkarte	Verantwortlichkeit bei der Kämmerei
Abwasserkanalpläne mit Hausanschlußskizzen	Abwasserkanäle, Hausanschlüsse, Fachdaten (Material, Durchmesser u.a.)	
Wasserleitungspläne mit Hausanschlußskizzen	Leitungen, Hausanschlüsse, Fachdaten (Material, Durchmesser u.a.)	Unvollständig und ungenau

Tabelle 2.1.1: Bei der Kommune vorhandene Karten und Pläne

Tabellen, Listen	Fachinhalt	Besonderheiten
Grundstücksdatei	Daten des Automatischen Liegenschaftsbuch des Vermessungsamtes	Kann weitere Daten aufnehmen (z.B. planungsrechtliche Festsetzungen)
Bauantragskartei, Baubuch	Verzeichnis über die Bauanträge	
Straßenbestands- und Hausnummernliste	Verzeichnis der Straßen und Hausnummern	
Technische Listen des Wasserwerkes (z.B. Zählerliste)	Details über Einbauteile	

Tabelle 2.1.2: Bei der Kommune vorhandene raumbezogene Fachdaten in Tabellen und Listen

Die Beispielkommune ist selbst verantwortlich für die Abwasserkanalisation und auch für die Wasserversorgung. Während die Zuständigkeit für das Abwasser häufig bei der Kommune selbst liegt, sind in der Regel Zweckverbände für die Wasserversorgung zuständig. In dieser Hinsicht liegt in der untersuchten Kommune also eher eine Ausnahmesituation vor.

Besonders zu erwähnen ist die Qualität der Wasserleitungspläne. Sie sind unvollständig und ungenau, so daß eine Digitalisierung der analogen Pläne für die Ersterfassung nicht in Frage kommt.

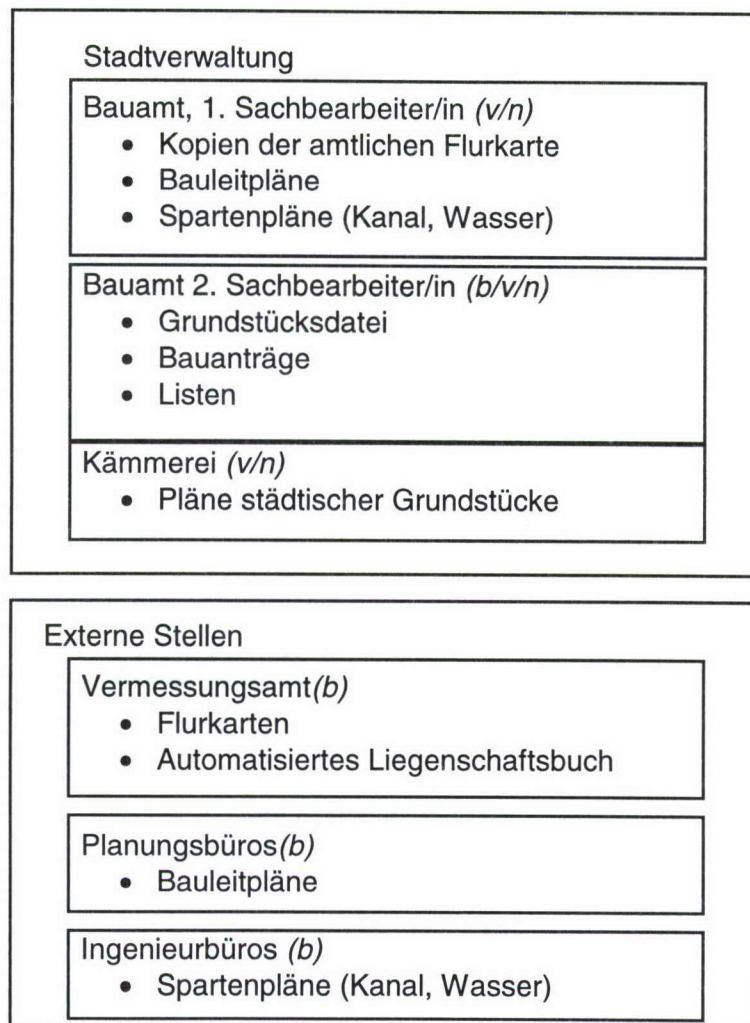
Neben den in der Tabelle aufgeführten Verzeichnissen gibt es noch weitere untergeordnete, kleinere Verzeichnisse, die hier nicht im einzelnen aufgeführt werden müssen.

2.2 Wer verarbeitet die raumbezogenen Daten ?

Bezüglich der Verarbeitung der raumbezogenen Daten wird unterschieden zwischen

- der Bearbeitung, als dem Erstellen und Fortführen von Plänen und Verzeichnissen,

- der Verwaltung im Sinne von "für die Daten verantwortlich sein und befugt sie weiterzugeben" und
- der Nutzung der Daten für die Erledigung eigener Aufgaben.



Übersicht 2.2.1: Übersicht über Stellen, die raumbezogene Daten der Kommune verarbeiten (*b*=bearbeiten (erzeugen, fortführen), *v* = verwalten, dafür verantwortlich sein, *n* = für eigene Aufgaben nutzen).

Die Bearbeitung bezogen auf die einzelnen raumbezogenen Daten ist in der Übersicht 2.2.1 zusammengefaßt.

In der Stadtverwaltung arbeitet in erster Linie das Bauamt mit raumbezogenen Daten. Konkret sind es hier zwei Sachbearbeiter, wobei der erste eher für die Pläne, der zweite für die Verzeichnisse zuständig ist. Diese Tätigkeiten stellen allerdings nur einen Teil der Aufgaben dieser Sachbearbeiter dar, so daß dafür nur ein geringer Teil ihrer Arbeitszeit zur Verfügung steht. In der Kämmerei werden die städtischen Grundstücke verwaltet. Die hierbei benutzten Flurkartenkopien werden im Bauamt angefertigt.

Für die digitale Bearbeitung der raumbezogenen Daten stehen im Bauamt ein Alpha-Terminal für die Abfrage der Grundstücksdaten zur Verfügung, das an die zentrale EDV-Anlage der Kommunalverwaltung angeschlossen ist, sowie ein Graphiksystem bestehend aus einem PC mit entsprechender Graphiksoftware, einem 20“-Bildschirm, Drucker und Plotter.

2.3 Wie werden die raumbezogenen Daten verarbeitet ?

Hinsichtlich der Art der Verarbeitung raumbezogener Daten der technischen Kommunalverwaltung kann man unterscheiden zwischen der Datenübernahme von externen Stellen, der analogen und digitalen Bearbeitung durch die Verwaltung selbst, der Bearbeitung durch externe Stellen sowie der Nutzung für die Verwaltungstätigkeit. Die Art der Verarbeitung ist in der Tabelle 2.2.2 zusammengestellt.

Art der Bearbeitung	Raumbezogene Daten
Datenübernahme von externen Stellen durch die technische Verwaltung	<ul style="list-style-type: none"> • Flurkarten (analog und digital) vom Vermessungsamt • ALB-Daten vom Vermessungsamt • Bauleitpläne und Spartenpläne von Planungs- bzw. Ingenieurbüros
Bearbeitung durch externe Stellen: Die Ergebnisse werden unabhängig von der Art der externen Bearbeitung (analog oder digital) als analoge Pläne an die Kommune übergeben. Lediglich die digitale Flurkarten und die ALB-Daten werden in digitaler Form übernommen.	<ul style="list-style-type: none"> • Flurkarten • ALB-Daten • Bauleitpläne • Kanalpläne mit Hausanschlußskizzen • Wasserleitungspläne mit Hausanschlußskizzen
Manuelle Plan- und Listenbearbeitung durch die Verwaltung selbst (Erstellung und Fortführung)	<ul style="list-style-type: none"> • Pläne städtischer Grundstücke (vom Bauamt für die Kämmererei) • Bauantragskartei • Straßen- und Hausnummernlisten
Nutzung für die tägliche Verwaltungstätigkeit durch Einsichtnahme, Erstellung von Kopien und Auszügen und durch Auswertungen	<ul style="list-style-type: none"> • alle vorhandenen analogen und digitalen Pläne

Tabelle 2.3.1: Art der Verarbeitung raumbezogener Daten

Als erstes ist es die reine Übernahme der Flurkarten in analoger bzw., soweit beim Vermessungsamt vorhanden, in digitaler Form und der Daten des Automatisierten Liegenschaftsbuches, die in das kommunale Graphiksystem bzw. die städtische Grundstücksdatenbank eingespielt und die nicht weiterbearbeitet werden, zu nennen. Außerdem werden die von Ingenieurbüros gelieferten Bauleitpläne und die Pläne der Abwasserkanäle und der Wasserleitungen übernommen, jedoch bisher nur die analogen Ausgaben. Die Art der externen Bearbeitung dieser Pläne ist nicht immer bekannt. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß sie überwiegend digital erfolgt und die Pläne auch digital übergeben werden könnten.

Auf herkömmliche Weise, also durch Zeichnung, Kopie oder Listen- bzw. Karteiführung, werden die Plankopien der städtischen Grundstücke, die Bauantragskartei und die Straßen- und Hausnummernliste erstellt bzw. fortgeführt.

2.4 Nutzung der raumbezogenen Daten

Die Nutzung der digitalen Daten, die sich momentan auf Sichtung und Ausgabe beschränkt, erfolgt an der graphischen Arbeitsstation im Bauamt bzw. an einem Alpha-Terminal. Genutzt werden auf diese Weise die digitalen Flurkarten, ein digitaler Bebauungsplan und die Grundstücksdatei.

Die Bauleitpläne, die Kopien der Flurkarten, die Grundstücksdatei, die Bauantragskartei und Bestandslisten werden im Bauamt für die Planung und Kontrolle der privaten und öffentlichen Bautätig-

keit, für die Bauleitplanung, die Planung städtischer Bauvorhaben, die Bearbeitung von Bauanträgen und die Ermittlung und Erhebung von Beiträgen und Abgaben genutzt..

Ferner ist das Bauamt, soweit die Stadt Versorgungsträger ist, zuständig für die Versorgung mit Wasser und die Entsorgung des Abwassers. Konkrete Aufgaben sind in diesen Bereich z.B. die Erteilung von Auskünften über Anschlußmöglichkeiten an Bauherren, die Behebung von Schäden. Die Planung von Netzerweiterungen- und -sanierungen wird üblicherweise an externe Büros vergeben. Grundlage für diese Aufgaben sind die Wasserleitungs- und Kanalpläne. Die Kämmerei nutzt die Plankopien von städtischen Grundstücken als Basis für die Verwaltung der städtischen Liegenschaften.

2.5 Austausch raumbezogenen Daten

Das Zusammenwirken der an der Bearbeitung, Verwaltung und Nutzung raumbezogener Daten beteiligten Stellen und damit auch der Datenaustausch ist bei der Konzeption eines kommunalen GIS zu berücksichtigen. Der derzeitige Datenfluß ist im Diagramm 2.5.1 wiedergegeben. Der Übersichtlichkeit halber beschränkt es sich auf Karten und Pläne. Für die Verzeichnisse mit raumbezogenen Fachdaten ergibt sich jedoch ein ähnliches Bild.

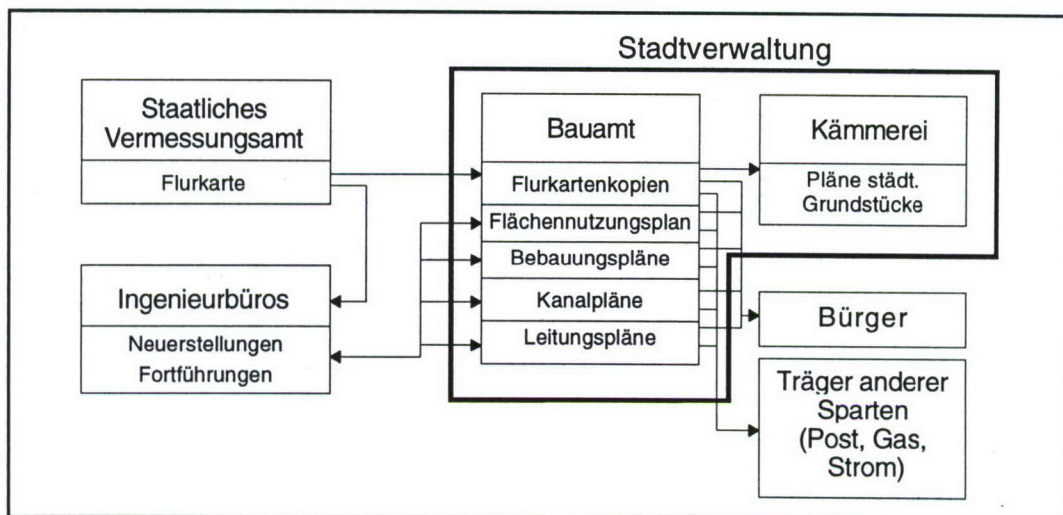


Diagramm 2.5.1: Datenfluß raumbezogener Daten der technischen Kommunalverwaltung

Die Basis der von der Kommune zu erstellenden Planwerke, nämlich der Bauleit- und Spartenpläne, ist die vom Vermessungsamt übernommene Flurkarte. Sie wird von der Kommune oder unmittelbar vom Vermessungsamt externen Ingenieurbüros zur Verfügung gestellt. Diese Pläne werden extern erstellt und auch extern fortgeführt bzw. verändert. Sie müssen daher zwischen dem Bauamt und den Ingenieurbüros in beide Richtungen ausgetauscht werden.

Das Bauamt stellt die Plankopien der städtischen Grundstücke der Kämmerei zur Verfügung.

Weiter nutzen die Bürger die Planunterlagen indirekt durch Anfragen an das Bauamt. Und schließlich tauschen die Spartenräger, nämlich die Kommune für Wasser und Abwasser, der Gasversorger, der zuständigen Energiezweckverband als Stromversorger und auch die Post Planungsauszüge bei Bauvorhaben aus.

3 Soll-Konzept

Mit dem bisher Gesagten ist der momentane Zustand in der Beispielkommune, der bei der Einrichtung eines kommunalen GIS zu berücksichtigen ist, beschrieben, und das Soll-Konzept, wie es sich nach der Einrichtung des GIS darstellen könnte, kann entwickelt werden.

3.1 Daten, Verknüpfungen und Anwendungen im konzipierten GIS

Bei der Definition des Soll-Konzeptes sollen zunächst der Inhalt des GIS und die anzustrebenden Anwendungen dargestellt werden. Dabei wird auf das GIS abgezielt, wie es in der Endausbaustufe aussehen sollte, die erst nach einigen Jahren erreicht werden kann.

Als neue, für das GIS erstmalig zu erfassende Daten bzw. Zugriffsmöglichkeiten auf Daten anderer Stellen wurden von der Beispielkommune gewünscht:

- die Einsichtnahme in fremde Spartenpläne,
- ein Grünflächenkataster aus Plan- und Sachdaten,
- eine Spielplatzübersicht,
- sowie eine Information über die vorhandene bauliche Nutzung der Grundstücke.

Die Daten des GIS kann man in Graphikdaten, die bisherigen aber auch neue Planwerke repräsentieren, und beschreibende Fachdaten unterteilen.

In der Übersicht 3.1 sind die Daten und die Verknüpfungen der Datensätze des zukünftigen GIS sowie die damit möglich werdenden Anwendungen dargestellt. Darin kann man zwischen Daten differenzieren, die schon existieren und in das GIS übernommen werden können, und solche Daten, die zwar schon vorhanden sind, aber im GIS in eine veränderte Beziehung zu den anderen Daten gelangen. Zur ersten Kategorie gehören auf der Seite der Graphikdaten die Flurkarte, die Bauleitpläne, die eigenen Spartenpläne, soweit sie qualitativ ausreichend sind, sowie der digitale Stadtplan als Übersichtsplan und auf der Seite der Sachdaten die ALB-Daten der Grundstücksdatei. Zur zweiten Gruppe zählen etwa die Hausanschlüsse, die nicht mehr separat abgelegt werden, sondern zu einem Bestandteil der Spartenpläne werden, sowie die Planungsdaten, die bisher nur im Bebauungsplan enthalten waren. Sie werden im GIS als Attribute zu den Grundstücken verwaltet. Ähnliche Änderungen treten bei den Daten der städtischen Liegenschaften und den Sachdaten zu den Leitungsplänen auf. Schließlich werden im GIS bisher nicht vorhandene Daten erfaßt, wie die Grünflächenpläne mit den zugehörigen Sachdaten.

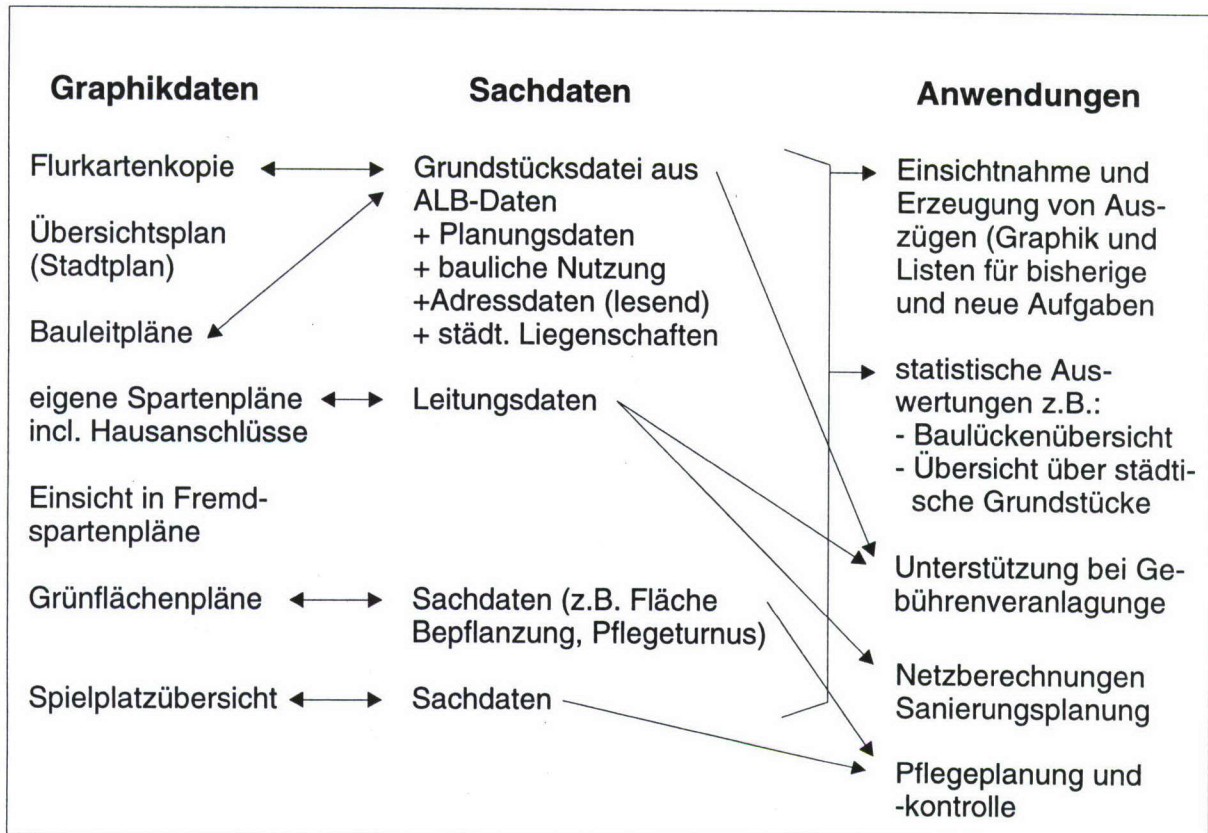
Bei PC-basierten Geoinformationssystemen müssen zwischen den Objekten in der Graphik und den Sachdaten, die in speziellen Fachdatenbanken verwaltet werden, Verknüpfungen hergestellt werden. Nur dann ist es möglich, von der Graphik ausgehend auf die Sachdaten zuzugreifen, und umgekehrt von den Sachdaten kommend selektierte Objekte, z.B. alle Kanäle, die älter als 50 Jahre sind, graphisch anzeigen zu lassen. Für den Anwender darf die getrennte Datenhaltung aber nicht spürbar werden, für ihn muß das GIS eine geschlossene Einheit darstellen.

Die notwendigen Verknüpfungen zwischen den Graphik- und Sachdaten werden in der Übersicht 3.1 durch die Verbindungslinien angezeigt. Sie sind als Minimum zu verstehen, weitere Verknüpfungen zwischen den Datenbeständen sind möglich. Zusätzliche Fachebenen, die auf der Basis der Flurkarte oder der Stadtplanübersicht aufsetzen, sind darüber hinaus denkbar.

In der dritte Spalte der Übersicht sind die möglichen Anwendungen des GIS aufgeführt, wobei die Pfeile die jeweils notwendigen Datenbestände angeben.

Als erste und wohl auch häufigste Anwendung des GIS ist die schnellere und zuverlässigere Einsichtnahme und Erzeugung von Auszügen, sowohl als Graphik, als auch als Ausdruck für die gesamte Palette der bisherigen und neuen Aufgaben zu nennen. Diesbezüglich wird auf alle Daten des GIS zugegriffen.

Neue Anwendungen ergeben sich aus der Möglichkeit statistische Auswertung und Abfragen vorzunehmen. So kann man aus einer Überlagerung der Planungsdaten und der baulichen Nutzung eine Baulückenübersicht ableiten. Die statistischen Auswertungen müssen auch auf alle Daten zugreifen können. Die Grundstücks- und evtl. Leitungsdaten sollten u.a. die Ermittlung von Erschließungsbeiträgen unterstützen. Für die Leitungen- und Kanäle lassen sich hydraulische Netzberechnungen durchführen, sowie Netzerweiterungen und -sanierungen planen. Schließlich lassen sich für die Grünflächen und Spielplätze Pflege- bzw. Wartungspläne aufstellen und kontrollieren.



Übersicht 3.1: Daten, Verknüpfungen und Anwendungen des konzipierten GIS

3.2 Aufgabenverteilung im GIS

Während die Größe einer Kommune die Daten und die Anwendungen des GIS-Daten nur in geringem Maße beeinflusst, ist sie dagegen bezüglich der Aufgabenverteilung beim Aufbau und Betrieb des GIS von großer Bedeutung. Je größer eine Kommune ist, desto mehr Funktionen des GIS kann sie selbst wahrnehmen, je kleiner sie ist, um so mehr muß sie auf externe Fachkräfte zurückgreifen.

Für die Kleinkommunen erscheint eine Aufgabenverteilung angebracht, wie sie in der Übersicht 3.2 wiedergegeben ist.

Die Datenakquisition, sowohl Ersterfassung als auch Fortführung erfolgt für alle Themenbereiche grundsätzlich in einem Fachbüro, das praktisch das GIS für die Kommune führt. Im einzelnen übernimmt dieses Ingenieurbüro die Grundkarte und die ALB-Daten vom Vermessungsamt in das GIS, das auch von der Gemeinde eingesetzt wird, und bereitet sie für die Bedürfnisse der Kommune auf. Das Ingenieurbüro erfaßt die Daten der Fachthemen durch Digitalisierung vorhandener Pläne, Vermessung und Eingabe von Sachdaten selbst oder übernimmt sie von einem spezialisierten Büro, z.B. die Daten des Abwasserkanals von einem Tiefbauingenieurbüro, und baut damit das GIS der Kommune auf. Auf gleiche Weise erfolgt die permanente Fortführung des GIS. Darüber hinaus müssen komplexe Aus-

wertungen, als Extrembeispiel sei eine hydraulische Netzberechnung genannt, vom Ingenieurbüro ausgeführt werden. Natürlich übergibt das Ingenieurbüro die aufbereiteten Daten regelmäßig an die Kommune oder ermöglicht ihr den direkten Zugriff auf die Daten im Netzwerk des Ingenieurbüros.

Ingenieurbüro	Kommune
<ul style="list-style-type: none"> • übernimmt Daten (DFK, ALB) vom Vermessungsamt in eine Vollversion des Geoinformationssystem der Gemeinde • und bereitet sie für die Anwendungen in der Gemeinde vor, (z.B. Freistellung des Straßenraumes, Verknüpfung der Flurstücke in der Graphik mit den ALB-Datensätzen) • erfaßt und modelliert Daten für das GIS durch <ul style="list-style-type: none"> - Digitalisierung, Vektorisierung - Planung, Vermessung - Sachdatenerfassung - Übernahme von anderen Ingenieurbüros • pflegt die Daten und führt sie fort durch Entwurfsplanung, Bestandsvermessung, Sachdatenerfassung, Datenübernahme • führt komplexe Auswertungen durch • erstellt Sonder- und Massenausgaben • stellt die Daten der Kommune zur Verfügung (Datenübergabe, Zugriff der Kommune auf die Daten im Netzwerk des Ingenieurbüro) <p>Das Ingenieurbüro benötigt hierfür eine Vollversion des Geoinformationssystems.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • informiert sich fallbezogen durch Einsichtnahme • nimmt Standardauswertung und -bearbeitungen vor, • erzeugt Ausgaben in Form von Plots und Ausdrucken <p>Die Gemeinde benötigt dazu eine Auskunftsstation als Subsystem des GIS bestehend aus</p> <p>Hardware:</p> <p>PCs, Farbgraphikbildschirm, Drucker, DIN-A3-Plotter</p> <p>Software:</p> <p>Graphik: Ansichts- und Plotfunktionen</p> <p>Sachdaten: Such-, Druck-, einfache Bearbeitungs- und Statistikfunktionen</p>

Übersicht 3.2: Mögliche Aufgabenverteilung in einem GIS bei einer Kleinkommune

Für die genannten Aufgaben benötigt das Büro den vollen Leistungsumfang des GIS und entsprechend qualifizierte Mitarbeiter.

Die Mitarbeiter in der Kommune ihrerseits nutzen das GIS für die tagtäglichen Verwaltungsaufgaben, indem sie fallbezogen die benötigten Informationen aus dem GIS abrufen, z.B. über baurechtliche Festsetzungen für ein Grundstück. Sie nehmen einfache Standardauswertungen und -bearbeitungen vor, wie die Erstellung einer Plan- und Listenübersicht über alle städtischen Grundstücke die verpachtet sind.

Für diese Aufgaben benötigt die Kommune ein in seinem Leistungsumfang stark eingeschränktes GIS, das von den GIS-Herstellern häufig als Auskunftssystem angeboten wird. Die Sachbearbeiter müssen nur einen eingeschränkten Teil der Funktionalität des Systems beherrschen.

Auf der Hardwareseite erfordert die Sichtstation lediglich einen PC, einen guten Farbgraphikbildschirm, einen Drucker und einen einfachen DIN A3-Plotter. Auf der Softwareseite werden Anzeige- und Plotfunktion für die Graphik sowie Such-, Druck- und einfache Bearbeitungs- und Statistikfunktionen für die Sachdaten benötigt.

Durch die vorgeschlagene Aufgabenverteilung wird das Risiko vermieden, die Kommune zu überfordern. Häufig werden große Investitionen für die Anschaffung von Hard- und Software getätigt, und es zeigt sich dann, das die wenigen Mitarbeiter einer kleinen Kommune neben ihren anderen, natürlich weiter bestehenden Aufgaben nicht die Zeit finden, sich in ein komplexes GIS einzuarbeiten und womöglich sogar selbst Daten zu erfassen. Das GIS wird dann u.U. eher als belastend empfunden und

innerlich abgelehnt. Die Hard- und Software schlummert vor sich hin, wird evtl. immerhin noch für die Textverarbeitung eingesetzt, erweist sich nach einiger Zeit aber als Fehlinvestition.

Die Mitarbeiter der Kommune sollen das GIS vielmehr als Unterstützung für ihre Arbeit kennen- und schätzen lernen, ohne sich um Datenbeschaffung und -pflege kümmern und ohne ein kompliziertes System erlernen zu müssen. Sollte sich im Idealfall im Laufe der Zeit herausstellen, daß die Mitarbeiter selbst mehr mit dem GIS arbeiten möchten, steht einer Aufgabenverlagerung vom Ingenieurbüro in die Stadtverwaltung nichts im Wege.

3.3 Zeit- und Kostenplan für die Einführung des GIS

Als abschließender Punkt des Aufsatzes wird ein Zeitplan für den Aufbau des GIS in der Beispielskommune entworfen (Tabelle 3.3).

Einführungsschritt	Zeitraum für den Einführungsschritt Jahre seit dem Start zum Aufbau eines GIS 0-----1-----2-----3-----4-----	ca. Kosten + 10% für Fortführung und Softwarepflege /Jahr
Hardwareanschaffung	entfällt (schon vorhanden)	
Graphiksoftware	entfällt (schon vorhanden)	
Grundstücksverwaltungssoftware	entfällt (schon vorhanden)	
Erwerb und Übernahme der digitalen Flurkarten vom Vermessungsamt (35), (13 vorhanden)	→	50.000,-
Übernahme 25000 ALB-Datensätze	entfällt (schon vorhanden)	
Erfassung von Planungsdaten zu 1000 Grundstücken und 2000 Gebäuden	↔	20.000,-
Übernahme neuer digitaler Bauungspläne	→	keine zusätzlichen Kosten für digitale Bearbeitung
Erfassung von 50 km Abwasserkanal mit Hausanschlüssen durch Vermessung, Konstruktion, Videountersuchung, Sachdateneingabe	↔	300.000,-
Beschaffung der Fachschale Abwasser des Auskunftssystems	⊗	5.000,-
Erfassung von 35 km Wasserleitungen mit Hausanschlüssen durch Ortung, Vermessung, Konstruktion, Sachdateneingabe	↔	200.000,-
Beschaffung der Fachschale Wasser des Auskunftssystems	⊗	5.000,-
Grünflächenplan und Spielplatzübersicht durch Vermessung und Sachdatenerfassung	↔	30.000,-
Beschaffung der Fachschalen Grünflächenverwaltung des Auskunftssystems	⊗	4.000,-

Tabelle 3.3: Zeit- und Kostenplan für die Einführung des GIS

Im vorliegenden Fall, sind im Bauamt die Hardwarekomponenten für eine Auskunftsstation wie sie im vorherigen Abschnitt definiert wurde, schon vorhanden. Ebenso die notwendige Graphiksoftware und ein Sachdatenbankmodul für die Grundstücksverwaltung. Wäre das nicht der Fall, sollte man die Systeminstallation nicht an den Beginn der GIS-Einführung stellen, sondern hiermit warten, bis ein Grundstock an digitalen Daten vorhanden ist, mit denen man schon arbeiten kann. Dieser Zeitpunkt liegt ca. ein bis eineinhalb Jahre nach dem Beginn der Datenerfassung.

Ein Eckpfeiler für die Einführung des GIS ist die Verfügbarkeit der digitalen Flurkarte auf der alle entscheidenden Fachebenen aufbauen. Im vorliegenden Fall sind von den 35 Flurkarten, die das bebaute Gebiet abdecken schon 13 als digitale Karten verfügbar. Für die Umsetzung der weiteren Karten wird das Vermessungsamt voraussichtlich vier Jahre benötigen, so daß alle Karten erst nach vier Jahren als digitale Karten zur Verfügung stehen werden.

Die Daten des Automatisierten Liegenschaftsbuches als Basis der Grundstücksdatenbank liegen ebenfalls schon vor. Ein kleiner, aber für die Nutzung der Grundstücksdatenbank und damit für deren Akzeptanz wichtiger Punkt ist ihre Erweiterung um die planungsrechtliche Festsetzungen und die bauliche Nutzung der Grundstücke. Diese Ergänzung der Grundstücksdaten muß daher ein erster Schritt beim Aufbau des GIS sein.

Neu entstehende Bebauungspläne sind digital zu entwerfen und in das System zu übernehmen. Die systematische Überführung der alten Bebauungspläne in das GIS ist unverhältnismäßig aufwendig. Die Einbringung der Spartenpläne in das GIS ist von allen Schritten der aufwendigste. Die Leitungen müssen teilweise geortet und eingemessen werden. Vorhandene Hausanschlußskizzen sind einzurechnen. Auch aus haushaltstechnischen Erwägungen sollte man diese Aufgabe über mehrere Jahre strecken. Alle Vorbereitungen incl. der Vergabe dieser Arbeiten dürften ca. 1 Jahr beanspruchen. Das heißt, ein Jahr nach der Entscheidung ein kommunales-GIS aufzubauen, kann mit der Erfassung der Leitungsdaten und der Daten über den Abwasserkanal begonnen werden. Der Aufbau eines Grünflächenkatasters hat keine vorrangige Bedeutung. Mit ihm sollte begonnen werden, wenn sich die bis dahin eingeführten GIS-Komponenten einwandfrei eingespielt haben.

Bezüglich der Kosten für die Einführung des GIS sind grobe Abschätzungen in der letzten Spalte der Tabelle 3.3 angegeben. Sie hängen stark von der Qualität der vorhandenen Datenquellen ab. Können vorhanden Pläne durch Digitalisierung und/oder Konstruktion übernommen werden, betragen die Kosten nur einen Bruchteil im Vergleich zu einer Vermessung vor Ort.

4 Fazit

Der gezeigte Weg zur Einführung eines GIS in der technischen Abteilung einer Verwaltung einer Kleinstadt beruht auf der Analyse einer konkreten Beispielkommune. Er ist aber analog auf andere Kommunen übertragbar, da dort ähnliche Aufgaben und Problemstellungen vorliegen. Die Verwaltung der Leitungen durch die Kommunalverwaltung ist jedoch eher die Ausnahme. Wichtig und allgemein zu empfehlen ist die vorgeschlagene Aufgabenverteilung zwischen Kommune und Dienstleister. Sie stellt sicher, daß das GIS in der Kommune akzeptiert und auf Dauer genutzt und geschätzt wird und von den Mitarbeitern nicht mehr entbehrt werden mag. Nur dann sind die mit dem Aufbau des GIS verbundenen Kosten sinnvoll angelegt.

5 Literaturverzeichnis

ARBEITSKREIS BERATENDER INGENIEUR - VERMESSUNG - BAYERN: *Der Weg zum geographischen Informationssystem, Ein Leitfaden von der Idee bis zur Verwirklichung für Kommunen, Versorgungsunternehmen, Zweckverbände.* abv-Bayern, 1991

- BARTELME, N.: *gis Technologie, Geoinformationssysteme, Landinformationssysteme und ihre Grundlagen*. Springer-Verlag, Berlin, 1988
- BUNDES-INGENIEUREKAMMER: *Bundeseinheitliche Richtlinien für das Erstellen und Fortführen eines kommunalen Informationssystems*, BIK-Verlagsgesellschaft, Wien, 1989
- WIESER, E.: *Systematische Analyse kommunaler Landinformationssysteme*. DGK, Reihe C, München, 1989

PHOTOGRAMMETRISCHE AUSWERTUNG VON BILDSEQUENZEN

Dipl.-Ing. Jochen Klemm

Institut für Geodäsie
Universität der Bundeswehr München
85577 Neubiberg
Email: jochen.klemm@unibw-muenchen.de

Zusammenfassung

Es wird zunächst gezeigt, wie die photogrammetrische Auswertung der Bildpaare im kinematischen Vermessungssystem KiSS abläuft. Die Vorgehensweise zur Vorabbestimmung der inneren und äußeren Orientierung wird ebenso dargestellt wie der Ablauf der Punktmessung in einem Bildpaar. Dabei wird auf die Nachteile einer bildpaarweisen Berechnung der Objektpunkte eingegangen.

Die Ausgleichung von Bildpaarsequenzen bietet im Gegensatz dazu die Möglichkeit, Mehrfachmessungen zu integrieren sowie zusätzliche Verknüpfungselemente einzubeziehen und so die Orientierungsparameter ggf. zu verbessern. Die gewählten Beobachtungsarten mit ihren Bedingungsgleichungen werden erläutert. Zusätzliche Bedingungen in Form horizontaler bzw. vertikaler Kanten können als Paßinformation die Stabilität erhöhen.

Für die Programmierung wird ein objektorientierter Ansatz der Ausgleichung vorgestellt. Dieser hat den Vorteil, sehr flexibel und damit leicht erweiterbar zu sein.

Schließlich wird der Ausgleichungsalgorithmus erläutert. Alle Eingangsgrößen außer den Bildkoordinaten werden als unbekannt und stochastisch angesehen, während die vorab geschätzten Werte als Pseudobeobachtungen eingeführt werden.

1 Einleitung

Es zeigen sich mehr und mehr Tendenzen, daß die klassische geodätische Aufnahme von modernen und flexiblen Aufnahmemethoden abgelöst wird. So hat gerade die Luftbildphotogrammetrie durch den Einsatz digitaler Aufnahme- und Auswertegeräte eine Renaissance erlebt.

Aber auch der Begriff kinematische Vermessung kommt in diesem Zusammenhang immer wieder vor. Der Begriff steht, wie der Name schon sagt, für Beobachtung während der Bewegung, wobei unterschiedlichste geodätische Meßmethoden kombiniert werden. Die Positionsbestimmung durch GPS ist dabei fast immer vorhanden. Zur Stützung kommen ggf. inertielle Sensoren, Weggeber, Barometer u. a. zum Einsatz. Nicht zuletzt werden für die eigentliche Objekterfassung optische Sensoren, zumeist CCD oder Videokameras, verwendet.

Die Notwendigkeit einer schnellen und billigen Aufnahmemethode zeigt sich darin, daß in letzter Zeit immer mehr Verwaltungen, Stadtwerke und Vermessungsämter begonnen haben oder bereits dabei sind, ihre Daten digital vorzuhalten. Verbunden wird dies meist mit einer Neuaufnahme, um von Beginn an aktuelle Daten zu haben.

Das kinematische Vermessungssystem KiSS kann zu dieser Umstellung beitragen, indem es Objekte mit einer Genauigkeit < 0.5 m CEP aufnimmt. Die photogrammetrische Auswertung der pro Sekunde aufgenommenen Bildpaare spielt dabei eine wichtige Rolle, weil neben den eigentlichen Beobachtungen - Bildkoordinaten der gesuchten Objekte - weitere Informationen aus den Bildern entnommen werden können, die wiederum zur Stützung der äußeren Orientierung beitragen.

2 Photogrammetrische Auswertung im Projekt KiSS

Das kinematische Vermessungssystem KiSS nutzt verschiedene Sensoren zur Bestimmung der Trajektorie. Auf die Sensoren und die Berechnung soll hier nicht weiter eingegangen werden (siehe z.B. GRAEFE/KLEMM/STERNBERG 1998). Das Ergebnis, das der photogrammetrischen Auswertung zur Verfügung gestellt wird, ist für jeden Zeitpunkt die Position und Lage des Ursprungs des Fahrzeugkoordinatensystems. Damit die Beobachtungen in ein übergeordnetes System transformiert werden können, müssen Position und Lage der beiden Kameras in diesem Koordinatensystem vorliegen.

Nachdem im Gegensatz zur klassischen Photogrammetrie keine signalisierten Paßpunkte vorliegen, aus denen sonst die äußere Orientierung abgeleitet wird, muß diese bei einem kinematischen Meßfahrzeug bereits zur Aufnahmezeit bekannt und fest sein.

Um die genannten Voraussetzungen zu erfüllen, sind eine Reihe vorbereitender Messungen und Berechnungen durchzuführen, die im folgenden kurz dargestellt werden.

2.1 Kalibrierung und Orientierung

Zunächst muß die innere Orientierung der CCD Kameras bestimmt werden. Dies geschieht in einer Selbstkalibrierung, in der mit zwölf Aufnahmen in verschiedenen Positionen und Lagen die Koordinaten des Bildhauptpunkts, die Kammerkonstante sowie zusätzliche Parameter für Verzeichnung und Affinitäten ermittelt werden. Durch die große Stabilität der Kameras genügt es, diese Parameter in längeren Zeitabständen (1 - 2 Jahre) zu überprüfen, was auch die bisherigen Erfahrungen mit dem System KiSS bestätigen.

Bei der Bestimmung der äußeren Orientierung müssen die Kameras bereits fest auf dem Fahrzeug montiert sein. Dadurch ist man bei der Anlage eines Punktfelds stark eingeschränkt, da dieses für das Fahrzeug zugänglich sein muß. Für KiSS wurde eine Gebäudewand mit einer großen freien Fläche davor ausgewählt. Die Positionen der einzelnen Meßmarken wurden in einem lokalen Koordinatensystem bestimmt, das dazu mit fest vermarkten Punkten mit einer Standardabweichung von ca. 0.3 mm in allen Koordinaten hergestellt wurde. Um eine räumliche Tiefe des Testfeldes zu gewährleisten, werden jeweils drei Stangen mit Meßmarken aufgestellt (s. Abb. 1), deren Koordinaten in der Bündelausgleichung mitgeschätzt werden.

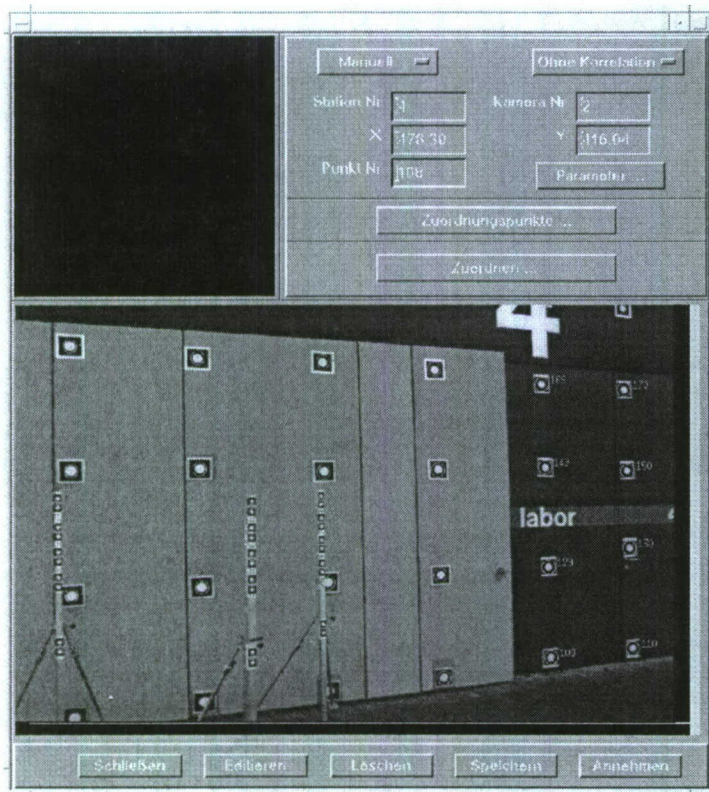


Abbildung 1: Bildmessung für die Bestimmung der relativen Orientierung

Für die Determination der relativen Orientierung mit einer Standardabweichung < 1 mm bzw. 6 mgon werden insgesamt sechs Bildpaare aufgenommen. In der Bündelblockausgleichung wird die innere Orientierung aus der Selbstkalibrierung als Pseudobeobachtung eingeführt, und die verbesserten Werte werden für die weitere Auswertung übernommen.

Die Ermittlung der absoluten Orientierung wird mit der Zentrierung der übrigen Sensoren im Fahrzeugkoordinatensystem verbunden. Mit Hilfe terrestrischer Beobachtungen werden die Transformationsparameter zwischen lokalem und Fahrzeugsystem bestimmt, so daß wegen der bekannten Transformationsparameter lokales - Kamerakordinatensystem auch die Position und Lage der beiden Kameras im Fahrzeugsystem festliegt.

2.2 Bildpaarweise Berechnung der Objektpunktkoordinaten

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt findet die Berechnung der Objektpunktkoordinaten für jedes Bildpaar getrennt statt. Es werden zunächst in einem Bild die gesuchten Objekte ausgewählt und in einem zoomten Bildausschnitt feingemessen (siehe Abb. 2). Anschließend wird im dazugehörigen zweiten Bild grob der Bereich angegeben, indem sich der korrespondierende Punkt befindet. Zur Kontrolle und zur Unterstützung wird dazu die Kernlinie eingeblendet, so daß man nur entlang dieser Linie suchen muß. Mit Hilfe eines Least-Squares-Matching Operators wird der Punkt im zweiten Bild mit Subpixelgenauigkeit lokalisiert. Sollte eine automatische Messung nicht möglich sein (z.B. unterschiedl. Hintergrund) kann die Messung manuell ausgeführt werden. Gleichzeitig mit der Messung wird auch ein Attribut, welches die Punktart beschreibt, ausgewählt und gespeichert.

Die Berechnung von dreidimensionalen Koordinaten mittels räumlichen Vorwärtsschnitts findet dann im lokalen Kamerakoordinatensystem statt. Anschließend erfolgt eine Transformation aller Punkte in das Fahrzeugsystem. Mit Hilfe der Trajektorie aus dem Kalman Filter und der Zeitreferenz, die in jedem Bild mit abgespeichert ist, werden alle Punkte in das Nutzersystem (GK, UTM, WGS84, ...)



Abbildung 2: Paarweise Bildmessung mit KiSS

transformiert. Mehrfach gemessene Punkte werden über eine einfache Mittelbildung zusammengefaßt. Die Gewichtung der einzelnen Werte ist dabei wegen der vielen Einflußgrößen und Transformationen, die sich auf das Endergebnis auswirken, mit großen Unsicherheiten behaftet.

Ein weiterer Nachteil dieser Lösung liegt darin, daß keine zusätzlichen Informationen in den Bildern genutzt werden können wie z. B. mehrfach gemessene Verknüpfungspunkte, die sonst in der Photogrammetrie üblich sind. Es handelt sich dabei um eindeutig identifizierbare, gut meßbare Hilfspunkte, die in mindestens zwei Bildpaaren beobachtbar sind. Dabei spielen die Objektkoordinaten keine Rolle, der Vorteil besteht in der Stützung der relativen Orientierung der Bilder, in diesem Fall zweier aufeinanderfolgender Bildpaare.

3 Ausgleichung von Bildpaarsequenzen

Um die eben genannten Vorteile zu realisieren, muß die photogrammetrische Berechnung, in diesem Fall in Form einer Ausgleichung, bereits in einem übergeordneten System stattfinden, damit Elemente, die in mehr als einem Bildpaar zu sehen sind, gemeinsam verarbeitet werden können.

Die beiden Kameras, deren Position im Fahrzeugkoordinatensystem bekannt ist, können dann für jeden Aufnahmezeitpunkt in das übergeordnete System transformiert werden. Diese äußere Orientie-

ung wird in der Ausgleichung aber nicht als deterministische Größe angesehen, sondern kann durch die vorliegenden Beobachtungen eine Verbesserung erfahren.

Im folgenden werden zunächst die möglichen Beobachtungsarten mit den dazugehörigen Beobachtungsgleichungen erläutert.

Anschließend wird ein objektorientierter Ansatz für einen Ausgleichungsalgorithmus vorgestellt. Davon ausgehend wird schließlich dessen Realisierung erörtert.

3.1 Beobachtungsarten

Die klassische Beobachtung in der Photogrammetrie ist die Punktmessung. Alle punktförmigen Objekte bzw. Verknüpfungspunkte werden in mindestens zwei Bildern gemessen und können mit den bekannten Bedingungsgleichungen, die sich aus der Kollinearitätsbedingung ergeben, in den Objektraum überführt werden.

$$\bar{\xi} = \xi_0 - cc \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (1)$$

$$\bar{\eta} = \eta_0 - cc \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Die eigentlichen Unbekannten sind die Koordinaten X , Y und Z des jeweiligen Objekts. Deshalb muß die äußere Orientierung in Form der Stationskoordinaten X_0 , Y_0 und Z_0 und der Elemente der Rotationsmatrix r_{ij} bereits gegeben sein. Die Behandlung dieser und auch anderer Eingangsgrößen im Ausgleichungsalgorithmus wird in Kapitel 3.3 ausgeführt.

Neben der äußeren muß noch die innere Orientierung, hier in Form des Bildhauptpunkts ξ_0 , η_0 und der Kammerkonstante cc , bekannt sein. Im ersten Ansatz wird davon ausgegangen, daß die Bildkoordinaten bereits um die zusätzlichen Parameter aus der Selbstkalibrierung verbessert sind. D.h., daß diese Parameter als feste, unveränderliche Größe angesehen werden. Dies entspricht aber nicht der Realität, besonders unter den teilweise extrem unterschiedlichen äußeren Verhältnissen, denen die Kameras während einer Meßfahrt ausgesetzt sind. Deshalb soll es grundsätzlich möglich sein, diese Parameter zwar als geschätzt anzusehen, sie aber bei einer ausreichend großen Anzahl von Beobachtungen zu verbessern und damit den Gegebenheiten anpassen zu lassen. Die Bedingungsgleichungen erhalten dann folgendes Aussehen:

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_0 - cc \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \delta x \\ \eta &= \eta_0 - cc \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \delta y \end{aligned} \quad (2)$$

wobei die δx und δy Korrekturterme mit den zusätzlichen Parametern nach dem Modell von BROWN (1971) darstellen.

Weitere, bisher nicht sehr oft genutzte Beobachtungen sind Kanten bzw. Geraden. In den beiden Bildern werden dazu korrespondierende Kanten gemessen, deren Länge nicht übereinstimmen muß. Es werden auch keine identischen Punkte auf den beiden Kantenstücken benötigt.

Der Ansatz zur Geradenbestimmung, der von MULAWA/MIKHAIL (1988) vorgeschlagen wird, beruht auf der Komplanarität dreier Vektoren, nämlich des Richtungsvektors der Geraden sowie der Richtungen vom Projektionszentrum zum Referenzpunkt der Geraden bzw. über einen bestimmten Bildpunkt zu einem beliebigen Punkt auf der Geraden. Diese drei Vektoren müssen in einer Ebene liegen oder anders ausgedrückt ihr Spatprodukt muß gleich null sein. In (3) und (4) wird dieser Zusammenhang dargestellt. Es wird also angenommen, daß jeder gemessene Kantenpunkt ein Repräsentant der Raumgeraden im Bild darstellt und folglich die Komplanaritätsbedingung erfüllen muß. Für jeden Kantenpunkt kann eine Beobachtungsgleichung aufgestellt werden. Die in diesem Ansatz gewählte Geradendarstellung benutzt sechs Parameter. Da bereits vier Parameter eine Gerade eindeutig im Raum festlegen, müssen zusätzlich zwei Bedingungen für die Gerade aufgestellt werden. Üblicherweise wird die Länge des Richtungsvektors der Geraden auf 1 normiert und \mathbf{M} so gewählt, daß er den Richtungsvektor zum Ursprung darstellt.

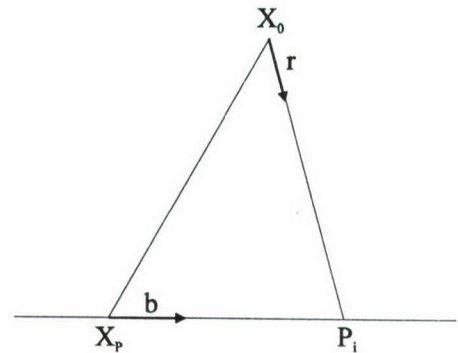


Abbildung 3: Prinzip der Geradenbestimmung nach Mulawa

$$\|\rho, \mathbf{N}, (\mathbf{M} - \mathbf{X}_0)\| = 0 \quad (3)$$

wobei

$$\rho = \mathbf{R} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ -cc \end{bmatrix} \quad (4)$$

Bedingungsgleichung für Geradenbeobachtungen

Es werden folglich noch vier Beobachtungen benötigt, um die Geradenparameter eindeutig zu bestimmen. Dies ist natürlich nur ein theoretischer Wert. In der Realität wird man nur Geraden auswählen, deren Länge im Bild mindestens 50 - 100 Pixel beträgt. Damit ist eine genaue und zuverlässige Schätzung der Raumgeraden möglich, und „schlechte“ Beobachtungen können besser erkannt und eliminiert werden. Außerdem muß man auch die Anzahl der zu bestimmenden Geraden begrenzen, weil der Aufwand für kleine Linien größer ist als der zusätzliche Informationsgewinn.

Es gibt natürlich viele weitere Möglichkeiten, eine Gerade im Raum darzustellen. Die hier vorgestellte hat den Vorteil, daß keine bestimmten Punkte auf der Geraden bzw. Hilfsgrößen λ nötig sind, so daß dieser Ansatz für das Aufgabengebiet optimal ist. Damit sind die beiden wesentlichen Beobachtungsarten beschrieben. Es gibt außerdem noch eine Möglichkeit, mit Vorwissen eine Paßinformation aus den Bildern zu erhalten, ohne Paßpunkte signalisieren zu müssen. Die Idee beruht darauf, daß vor allem im Ortsbereich viele Kanten horizontal bzw. vertikal sind (z.B. Gebäudekanten, Fenster, ...). Bringt man dieses Wissen ein, kann man die Freiheitsgrade zur Bestimmung der Geraden weiter reduzieren, was wiederum die Schätzung der äußeren Orientierung, hier vor allem des Roll- und teilweise des Nickwinkels, verbessern kann. Im Bereich von Gebäuden, wo es sehr häufig parallele Kanten gibt, reduziert sich der Freiheitsgrad bei horizontalen Kanten auf einen Höhenunterschied.

Weitere wichtige Kanten im Bild sind der Straßenrand und die Fahrbahnmarkierungen. Diese werden meistens ohnehin mitbestimmt, um daraus z.B. die Trassierungselemente zu bestimmen, weil die Trajektorie nicht den Straßenverlauf, sondern die Spur des Fahrzeugs mit allen hoch- und niederfrequenten Störungen darstellt. Außerdem gibt es bereits Methoden, die den Straßenrand automatisch in Bildsequenzen verfolgen können. Das Problem besteht hier in der Modellierung im Objektraum, weil es sich natürlich nicht (nur) um Geraden handelt. Eine Berechnung durch Splines oder Polynome erscheint hier sinnvoll. Man ermittelt für jedes Bildpaar die notwendigen Parameter und verändert diese dann so, daß sich eine glatte Kurve ergibt. Dadurch läßt sich besonders das Azimut stützen, so daß man bei der Modellierung wahrscheinlich auf die Höhenkomponente verzichten kann.

3.2 Objektorientierter Ansatz für die Ausgleichung

Die Programmierung der Ausgleichung der Messungen in Folgen von Bildpaaren erfolgt objektorientiert mit Visual C++. Dazu muß zunächst eine Analyse durchgeführt und ein objektorientiertes Design für das Problem entwickelt werden, um Klassen und Objekte sowie deren Interaktionen zu finden und darzustellen. Dies gibt einen sehr guten Überblick über den Ablauf der Ausgleichung. Abbildung 4 zeigt ein sogenanntes logisches Diagramm in der Booch Notation, das mit dem CASE Tool Rational Rose C++ erstellt wurde. Dabei steht jede „Wolke“ für eine Klasse (bzw. Objekt) und die Linien zeigen, daß mehr oder weniger starke Verbindungen zwischen den Klassen bestehen. Die schwächste ist der einfache Strich, der eine Assoziation darstellt, die meist mit einem Namen oder einer Bezeichnung versehen wird. Ein einfacher Kreis an einem Ende zeigt eine Aggregation. Man spricht auch von einer Uses-Relationship, d.h. die Klasse mit dem Kreis „benutzt“ die andere Klasse. Noch fester ist die Beziehung, wenn die Linie mit einem schwarzen Punkt endet. Hierbei sind die Klassen am anderen Ende Teil der Klasse mit dem Punkt. Aus der Sicht dieser Klasse wird auch von einer Has-Relationship gesprochen.

Beispiele für diese Beziehungen kann man direkt anhand der Abbildung erläutern. Auf der linken Seite stehen alle Eingangsgrößen, die sich zunächst in zwei Gruppen einteilen lassen. Die *Bildkoordinaten* sind Beobachtungen, während man die gesamte Orientierung, die Objektpunkte und die Geraden als Unbekannte sehen muß. Die *Bildkoordinaten* sind also Teil der *Beobachtungen*. Nicht ganz so eindeutig ist es bei den anderen Klassen. Diese können auch beobachtet sein und sind dann beiden Gruppen zuzuordnen. Deshalb besteht zur Klasse *Unbekannte* nur eine Assoziation, indem sie Näherungswerte für die Linearisierung des Unbekanntenvektors liefern. Eine weitere Verbindung existiert mit *gemessene Unbekannte*, wenn Beobachtungen und stochastische Informationen für die Eingangsgrößen vorliegen. *Gemessene Unbekannte* ist dann selbst wieder Teil der *Beobachtungen*.

Eine wichtige Klasse mit sehr vielen Beziehungen ist *Beobachtungsgleichungen*. So gibt es Assoziationen mit den beiden Jacobimatrizen, also den Ableitungen der Beobachtungsgleichungen nach den Unbekannten bzw. den Beobachtungen. Die verschiedenen Gleichungen der Beobachtungsarten sowie Bedingungsgleichungen sind Teil der Klasse, während sie selbst Teil des Ausgleichungsalgorithmus ist. Hierbei sieht man sehr gut, daß sich ziemlich einfach weitere Arten von Beobachtungsgleichungen hinzufügen lassen.

Die wichtigste Klasse schließlich ist der *Ausgleichungsalgorithmus*. Er enthält alle wichtigen Klassen für die Durchführung der Ausgleichung. Die *Beobachtungsgleichungen* mit den *Beobachtungen* sowie den beiden Jacobimatrizen enthalten alle Eingangsdaten, während im *Unbekanntenzuschlag*, den *Verbesserungen* sowie der *Kovarianzmatrix der Unbekannten* die Ergebnisse Niederschlag finden. Nicht dargestellt ist eine möglicherweise notwendige Iteration.

Es wird weiterhin natürlich ein Steuerelement benötigt, auf das in der Darstellung aber bewußt verzichtet wurde, weil es für die Erläuterung der Zusammenhänge nicht relevant ist.

Das gleiche gilt für die Benutzeroberfläche. Es werden Dialoge benötigt für eine Interaktion mit dem Benutzer, damit er die Quellen für die Eingangsgrößen angeben bzw. ändern kann. Für eine Interpretation des Ausgleichungsergebnisses sind verschiedene grafische Visualisierungselemente vorgesehen. Aufgrund der Ergebnisse können dann Eingangsparameter verändert oder bestimmte Beobachtungen hinzugefügt bzw. weggelassen werden.

3.3 Der Ausgleichsalgorithmus

Vor der eigentlichen Erläuterung des Algorithmus sind noch einige Überlegungen bezüglich der Unbekannten anzustellen. Als Eingangsgrößen werden die Orientierungsparameter aus der Kalibrierung verwendet, die in einer Bündelblockausgleichung ermittelt wurden. Es handelt sich dabei also um geschätzte Größen und man begeht einen Fehler, wenn man sie als fest und unveränderlich betrachtet. Um sie als statistische Größen, die eine Verbesserung erfahren können, in die Ausgleichung einzuführen, gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder werden alle Parameter als Pseudobeobachtungen aufgefaßt und erhalten dementsprechend eine Verbesserung, oder sie werden als unbekannt angesehen und die vorliegenden Werte sind direkte Beobachtungen der Unbekannten. Der zweite Ansatz erscheint hier besser, wenn man darüber hinaus diese Betrachtungsweise auch für die Punkte und Geraden im Objektraum übernehmen will. Liegen nämlich in einer Sequenz Messungen von Punkten vor, die bereits in der vorherigen Sequenz geschätzt wurden, so lassen sich diese Ergebnisse ebenfalls als Beobachtungen einführen. Dieser Ansatz hat den Vorteil, alle möglichen Konstellationen zuzulassen, wie z.B. Selbstkalibrierung, Überprüfung der relativen Orientierung, Berücksichtigung von Paßpunkten usw..

Das verwendete Modell wird als Ausgleichung nach bedingten Beobachtungen mit bedingten und gemessenen Unbekannten bezeichnet (SCHMID 1977, WOLF 1978). Es ist ein sehr allgemeiner und damit flexibler Ansatz. Das Gleichungssystem lautet allgemein

$$F(l, x) = 0 \quad (5)$$

Es ist sinnvoll, das Gleichungssystem nicht als ganzes zu betrachten, sondern Teilsysteme aufzustellen. In diesem Fall können drei Gleichungssysteme mit einem inneren Zusammenhang gefunden werden:

- Bedingungsgleichungen der Objektpunkte
- Bedingungsgleichungen der Geraden
- Gemessene und bedingte Unbekannte

Als unbekannt und stochastisch werden alle Größen angesehen, die nicht Bildkoordinaten sind, also die gesamte Orientierung sowie alle im Objektraum zu bestimmenden Größen. In der dritten Gruppe wird dann für jede Unbekannte eine Beobachtung mit einem Gewicht eingeführt. Für nicht beobachtete Unbekannte wird das Gewicht auf 10^{-31} , für nichtveränderliche auf 10^{31} festgesetzt. Damit wird die Invertierbarkeit der Gewichtsmatrix gewährleistet. Die Begründung für die Einbeziehung aller Unbekannten wird später erläutert. Die linearisierten Bedingungsgleichungen lauten jetzt:

$$\begin{array}{ll} A_p v_p + B_p \Delta = w_p & \text{Bildkoordinaten der Objektpunkte} \\ A_g v_g + B_g \Delta = w_g & \text{Bildkoordinaten der Geraden} \\ A_x v_x + B_x \Delta = w_x & \text{Gemessene und bedingte Unbekannte} \end{array} \quad (6)$$

wobei jeweils

$$A = \frac{\partial F}{\partial l}; \quad B = \frac{\partial F}{\partial x}; \quad w = F(l, x^0) \quad (7)$$

Mit der Bedingung, die gewichtete Quadratsumme der Verbesserungen zu minimieren, also in diesem Fall die Summe aus den drei Verbesserungsgruppen, ist folgendes Gleichungssystem zu lösen:

$$\begin{array}{l} -P_p v_p + A_p^t k_p = 0 \\ -P_g v_g + A_g^t k_g = 0 \\ -P_x v_x + A_x^t k_x = 0 \\ B_p^t k_p + B_g^t k_g + B_x^t k_x = 0 \end{array} \quad (8)$$

Die k_i sind dabei die sogenannten Korrelatenvektoren. Betrachtet man die Bedingungsgleichungen für gemessene Bildpunkte, so erkennt man, daß jede Beobachtung explizit und genau einmal auftritt. D.h., dieses Teilsystem stellt den Sonderfall einer vermittelnden Ausgleichung dar, womit die A Matrix zur Einheitsmatrix wird. Das gleiche gilt für die dritte Gruppe, wenn, wie vorausgesetzt, die Bedingungen nicht deterministisch, sondern mit einem endlichen Gewicht eingeführt werden. Liegen keine zusätzlichen Bedingungen vor, wird auch noch die B Matrix zur (negativen) Einheitsmatrix.

Eliminiert man jetzt in (8) die Verbesserungen und Korrelaten, erhält man die Lösung für Δ :

$$\begin{aligned} & -\left[B_p^t P_p B_p + B_g^t (A_g Q_g A_g^t)^{-1} B_g + B_x^t P_x B_x\right] \Delta = \\ & \left[B_p^t P_p w_p + B_g^t (A_g Q_g A_g^t)^{-1} w_g + B_x^t P_x w_x\right] \end{aligned} \quad (9)$$

oder $N_{\Delta} \Delta = w_{\Delta}$ und damit: $\Delta = N_{\Delta}^{-1} w_{\Delta}$

Damit wird klar, daß in der dritten Gruppe alle Unbekannten vorkommen müssen, weil sonst nicht die Matrizensummen gebildet werden können. Das heißt aber nicht, daß alle Unbekannten in allen Teilsystemen vorkommen müssen. Es reicht aus, wenn diese Bedingung für das Gesamtsystem erfüllt wird. Voraussetzung für eine stabile Lösung ist allerdings eine gute Verknüpfung zwischen den Teilsystemen, die aber vor allem durch die Orientierungsparameter immer gegeben ist.

Für die Varianz der Gewichtseinheit ergibt sich:

$$s_o^2 = \frac{v_p^t P_p v_p + v_g^t P_g v_g + v_x^t P_x v_x}{r + m - u} \quad (10)$$

wobei:

r : Anzahl der Bedingungsgleichungen

m : Anzahl der gemessenen und bedingten Unbekannten

u : Anzahl der Unbekannten.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Verfahren zur Ausgleichung von Bildsequenzen für die Bestimmung von Objektpunkten vorgestellt. Als Beobachtungen werden Bildpunkte und gerade Kanten verwendet. Zusätzliche Bedingungen in Form von horizontalen und vertikalen Kanten erhöhen die Stabilität und eröffnen zusammen mit den Verknüpfungselementen die Möglichkeit, die vorher geschätzte Orientierung zu verbessern. Um dies zu ermöglichen, werden die Orientierungsparameter als unbekannt und stochastisch angesehen und die geschätzten Werte als Pseudobeobachtung eingeführt.

Es ist anhand realer Daten zu untersuchen, welche Genauigkeitssteigerung mit dieser Vorgehensweise erreicht werden kann. Außerdem sind die Überlegungen weiterzuführen, wie der Straßenrand bzw. die Fahrbahnmarkierungen modelliert werden können.

Für die Zukunft muß für den Meßvorgang ein höherer Automationsgrad angestrebt werden. Vor allem für die Extrahierung von Verknüpfungselementen sowie der Fahrbahnrand gibt es bereits gut funktionierende Algorithmen, die in den Auswerteprozeß eingebunden werden müssen.

5 Literatur

BROWN, D.C.: *Close-Range Camera Calibration*. Photogrammetric Engineering, 37 (8), 1971

GRÄFE, G., KLEMM, J., STERNBERG, H.: *Das kinematische Vermessungssystem KiSS - Bestimmung der geometrischen Größen zwischen den Sensoren und Transformation der Sensorergebnisse in das KiSS Fahrzeugsystem*, Festschrift 25 Jahre Institut für Geodäsie, 1998

MULAWA, D., MIKHAIL, E.M. : *Photogrammetric Treatment of linear features*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 27/B10, III/383-393, 1988

SCHMID, H.H.: *Ein allgemeiner Ausgleichungsalgorithmus für die numerische Auswertung in der Photogrammetrie*, Mitteilungen des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich, 22, 1977

WOLF, H.: *Ausgleichungsrechnung I*, Dümmeler Verlag, Bonn, 1978

NICHTLINEARE ANALYSE EINER REALEN ZEITREIHE IM VERGLEICH ZU BEKANNTEN CHAOTISCHEN UND ZUFÄLLIGEN SYSTEMEN

Dr.-Ing. Rolf König

GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)

Aufgabenbereich 1: Kinematik und Dynamik der Erde

c/o DLR

82230 Oberpfaffenhofen

Zusammenfassung

Seit einigen Jahren werden auch in den Geowissenschaften neuartige Methoden der Zeitreihenanalyse zur Suche nach deterministischem Chaos eingesetzt. Der alte Gedanke von Poincaré, daß es dynamische Systeme gibt, deren Verhalten eben nicht für alle Zeiten vorhergesagt werden kann, genießt somit moderne Aufmerksamkeit. Im Folgenden wird der Versuch unternommen, in einführender Weise diese nichtlinearen Analysen auf eine real gemessene Zeitreihe anzuwenden. Als geeignetes Objekt erscheinen die über fünf Jahre operationellen Betriebes festgestellten Fehler der Bahnvorhersagen für den Satelliten ERS-1, die schon vorab Zeichen chaotischen Verhaltens erkennen lassen. Zur Validierung der implementierten Werkzeuge nichtlinearer Analyse werden gleichzeitig analoge Zeitreihen, die aus der Dynamik bekannter chaotischer und zufälliger Systeme gewonnen werden, verarbeitet. Über den Vergleich der Ergebnisse ergibt sich außerdem eine intuitive Interpretation der Dynamik der untersuchten Bahnvorhersagefehler.

1 Einführung

Neuere Analysenmethoden aus dem Umfeld der Chaostheorie haben in den letzten Jahren Eingang in die Wissenschaften und auch in weite Bereiche der Geophysik gefunden. Insbesondere die Rekonstruktion eines mehrdimensionalen dynamischen Systems aus einer gemessenen eindimensionalen Zeitreihe mit Hilfe der Einbettungsmethode wurde zur Grundlage verschiedener Anwendungen. So suchten NICOLIS, NICOLIS (1985) nach chaotischen oder seltsamen Attraktoren (im Englischen "strange attractors") in der Dynamik des Klimas aufgrund von Zeitreihen der Konzentration bestimmter Isotope aus der Analyse von Tiefseebohrkernen, ROBERTS (1991) in der Magnetfelddynamik mit Hilfe von Zeitreihen geomagnetischer Indizes. In jüngster Zeit wurde von STONE ET AL. (1998) der Versuch unternommen, die Unwägbarkeiten des aktuellen Wetterphänomens El Niño zu erklären.

Attraktoren stellen Verhaltensmuster dynamischer Systeme dar. Sie können als geometrische Figuren im Phasenraum aufgefaßt werden, einem abstrakten Raum, in dem die zeitliche Entwicklung des Systems beschrieben ist. Zum Beispiel läßt sich die Bewegung eines Pendels als Kurve oder Bahn in einem zweidimensionalen Phasenraum darstellen, der von Ort und Geschwindigkeit aufgespannt wird. Die Bahn eines gedämpften Pendels, das ja letztlich zum Stillstand kommt, strebt spiralförmig auf einen Punkt zu. Unabhängig davon, wie das Pendel angestoßen wird, wird die Bahn von diesem Punkt immer wieder angezogen, deshalb spricht man von einem Fixpunktattraktor. Demgegenüber zeichnen sich chaotische Attraktoren durch eine komplizierte geometrische Figur im Phasenraum aus. Diese Figur ist von fraktaler, also nicht ganzzahliger Dimension. Gelingt es, eine fraktale Dimension nachzuweisen, hat man einen chaotischen Attraktor gefunden und damit auch ein chaotisches System.

Ein chaotisches System erscheint einem Betrachter unberechenbar oder zufällig. In der Tat kann die Dynamik durch nichtlineare, deterministische Bewegungsgleichungen beschrieben werden, man spricht deshalb von deterministischem Chaos. Chaotische Systeme sind immer nichtlinear, das entscheidende Merkmal aber ist ihre Sensitivität gegenüber den Anfangsbedingungen, kleine Änderungen derselben führen in kurzer Zeit zu extrem unterschiedlichen Ergebnissen. Im Phasenraum führt dieser im allgemeinen Sprachgebrauch bekannt gewordene Schmetterlingseffekt dazu, daß sich ursprünglich dicht nebeneinanderliegende Bahnen mit der Zeit exponentiell voneinander entfernen. Die Vorhersagbarkeit des Systems wird so auf ein kurzes Zeitintervall beschränkt. Dagegen ist die zeitliche Entwicklung eines deterministischen Systems eindeutig festgelegt.

Als Beispiel für ein deterministisches System gilt die Vorhersage des Verlaufs der inneren Planetenbahnen. Auf der Basis der Newtonschen Gravitationsgesetze gelingt dies über viele Jahre im Voraus. Dagegen fällt es ungleich schwerer, die Bahn des künstlichen Erdsatelliten ERS-1 zu präzisieren, schon nach Tagen können die Fehler an die Toleranzgrenze stoßen. Allein schon aufgrund dieser zeitlichen Begrenzung könnte hier ein Chaosregime vermutet werden. Nachfolgend sollen die Zeichen von Chaos in den ERS-1 Bahnvorhersagen besprochen und quantifiziert werden. Dazu wurden neuartige Analysewerkzeuge implementiert und gleichzeitig auf bekannte zufällige und chaotische Systeme angewandt. So ergibt sich neben der Validation der Prozeduren eine intuitive Interpretation der zu untersuchenden Zeitreihe.

2 Die Daten

ERS-1 (European Remote Sensing satellite) wurde im Juli 1991 in einen erdnahen Orbit mit einer Bahnhöhe von ca. 800 km gebracht. Über fünf Jahre, weit länger als vorgesehen, hat ERS-1 seinen Dienst versehen bis seine Funktionen vorläufig eingefroren wurden. Der Satellit wurde von den weltweit verteilten SLR-Stationen (Satellite Laser Ranging) angemessen. Die Bahnberechnung erfolgte zu Beginn der Mission mit einer Genauigkeit von ca. 40 cm in radialer Richtung, durch Verbesserung der Störkraftmodelle liegt die Genauigkeit inzwischen bei 8 cm. Damit die SLR-Stationen Satelliten anzielen können, benötigen sie sehr genaue Bahnvorhersagen, die im Fall von ERS-1 vom GFZ/D-PAF (GeoForschungsZentrum Potsdam, German Processing and Archiving Facility), einem Teil des deutschen ERS-

Bodensegments, geliefert wurden (MASSMANN ET AL., 1994).

Die Bahnvorhersagen basieren auf einer Vorwärtsintegration der Bahn modelliert mit Parametern, die aus zurückliegenden Beobachtungen bestimmt wurden, und mit Modellannahmen, die dem besten Wissen zum Zeitpunkt der Generierung entsprechen. Insbesondere Fehler in der Modellierung des Widerstands der Hochatmosphäre bilden sich in Bahnvorhersagefehler in Flugrichtung, den "Along-track"-Fehlern, ab. In SLR-Kreisen spricht man vom "Time Bias" oder der Zeitablage, da der Satellit entweder zu früh oder zu spät auftaucht. Die Alongtrack-Fehler der Bahnvorhersagen lassen sich nachträglich aus neuen Messungen bestimmen. Die Fehler der Bahnvorhersagen quer zur Flugrichtung ("cross-track") und in radialer Richtung sind meist so klein, daß sie im SLR-Betrieb keine Rolle spielen.

Tiefflieger wie ERS-1 sind im Hinblick auf Alongtrack-Fehler besonders empfindlich. Zu den generellen Unsicherheiten der Atmosphärenmodelle, die von Experten mit ca. 20 % angegeben werden, kommt bei ERS-1 die komplexe Figur des Satelliten mit seinen riesigen Antennen und seinem gewaltigen Zentralkörper oder Bus. Die Alongtrack-Fehler wachsen gewöhnlicherweise exponentiell an. Der Fehlergang läßt sich durch ein Polynom approximieren und damit die weitere Fehlerentwicklung extrapolieren. Im Fall von ERS-1 setzte hier allerdings der Betrieb des Satelliten Grenzen: ERS-1 mußte so geflogen werden, daß sich seine Bahn nach einer gewissen Anzahl von Tagen wiederholte. Um die geforderten Toleranzen einzuhalten, wurde der Satellit recht häufig manövriert. Mit jedem Manöver entstand somit ein Bruch.

Während der ERS-1 Mission wurden Qualitätskontrollen der Bahnvorhersagen auf täglicher Basis durchgeführt. Die zu den einzelnen Meßzeitpunkten berechneten Alongtrack-Fehler wurden auf den Zeitpunkt 0 Uhr interpoliert und zu Zeitablagen umgerechnet. Insgesamt liegen somit 1828 äquidistante Punkte für die folgenden Untersuchungen vor. Radiale und Crosstrack-Fehler wurden wegen ihrer geringen Bedeutung nicht archiviert. Die Auflösung der Zeitablagen beträgt 1 ms, die Standardabweichung der interpolierten Werte ca. 3 ms. Zum besseren Verständnis: Der Satellit legt im Zeitintervall von 1 ms einen Weg von ca. 7 m zurück. Die Zeitreihe zeigt keinen signifikant von Null verschiedenen Mittelwert und keinen signifikanten Trend, die empirische Standardabweichung ergibt sich zu 191 ms.

Um den Vergleich mit bekannten chaotischen und zufälligen Systemen angehen zu können, wurden zwei zusätzliche Zeitreihen generiert mit demselben empirischen Mittel und derselben empirischen Standardabweichung. Eine Zeitreihe besteht aus der X-Koordinate des Rössler-Chaos, nach RÖSSLER (1976) aus der Vorschrift

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -(y+z) \\ \dot{y} &= x+0.2 \cdot y \\ \dot{z} &= 0.2+z \cdot (x-8.5)\end{aligned}\quad (1)$$

gebildet. Die dritte Zeitreihe besteht aus normalverteilten Zufallszahlen. Alle Zeitreihen sind zum Vergleich in Abb. 1 dargestellt.

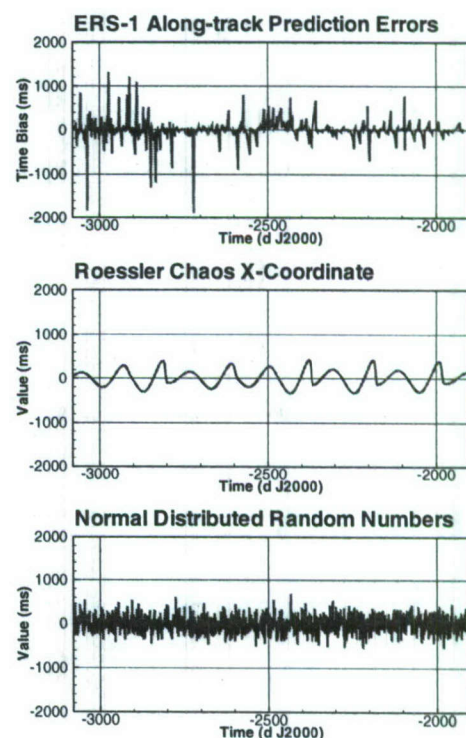


Abb. 1 Vergleich der untersuchten Zeitreihen

3 Standardanalysen

Alle drei Zeitreihen werden einer Regressionsanalyse unterworfen, in keinem Fall lassen sich systematische Ablagen oder Trends nachweisen. Für die ERS-1 Bahnvorhersagefehler ist das Ergebnis eine entscheidende Voraussetzung für die Analysen im weiteren Teil dieser Untersuchung, für die Rössler-Reihe und die Zufallszahlenreihe ist das Ergebnis selbstverständlich.

Im zweiten Schritt werden die Zeitreihen auf Normalverteilung getestet. Natürlich folgen nicht alle stochastischen Ereignisse der Gaußschen Normalverteilung, sie hat sich allerdings über Jahrzehnte als genügende Approximation der Natur nahezu aller gemessenen Daten erwiesen. Insofern ist dieser Test ein Punkt, auf den ein "nach Kochrezept" vorgehender Bearbeiter automatisch stößt. In Abb. 2 werden die Histogramme der Zeitreihen im Vergleich gezeigt. Mit bloßem Auge kann der Betrachter erkennen, daß die ERS-1 Bahnvorhersagefehler und die Rössler-Reihe keiner Normalverteilung gehorchen, was auch mit einem gängigen statistischen Test nachgewiesen wird.

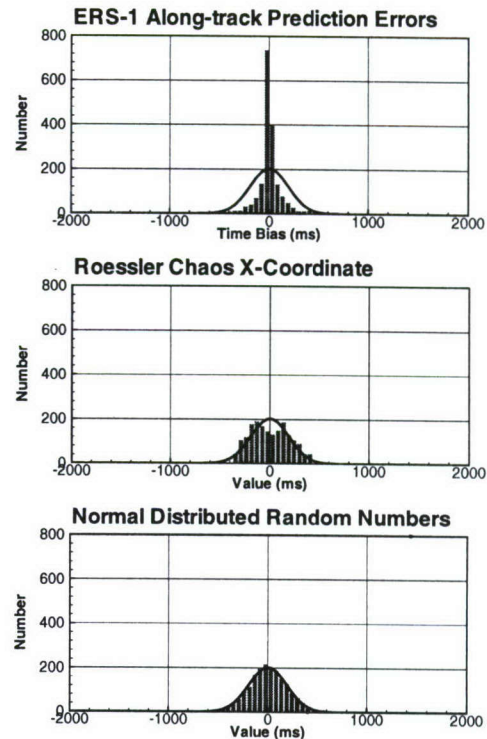


Abb. 2 Histogramm der Zeitreihen

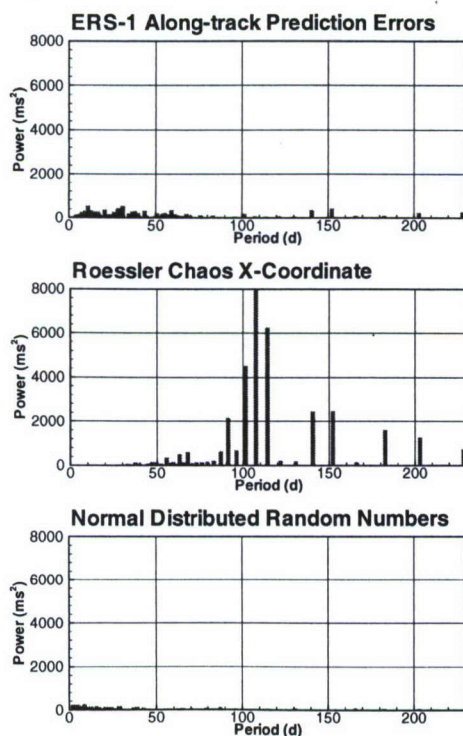


Abb. 3 Energiedichten der Zeitreihen

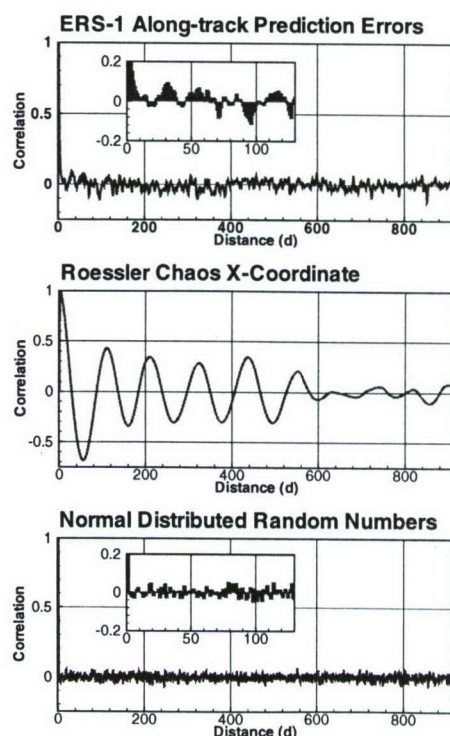


Abb. 4 Autokorrelationen

Im dritten Schritt folgt eine Fourieranalyse, um periodische Effekte aufzudecken. Abb. 3 enthält die Energiespektren der drei Zeitreihen, Abb. 4 zeigt einen Zoom in den hochfrequenten Bereich. Die ERS-1 Bahnvorhersagefehler zeigen keine klar hervortretende Periode außer andeutungsweise bei 12 und 32 Tagen. Dies kann nicht auf einen physikalischen Hintergrund wie z.B. Abstand der Bahnmanöver-

intervalle oder Umlaufperiode des Mondes etc. zurückgeführt werden. In der Rössler-Reihe dagegen ist eindeutig die Umlaufperiode von über 100 Tagen erkennbar. Wie für weißes Rauschen typisch, sind die Energiedichten der normalverteilten Zufallsreihe über alle Frequenzen in etwa gleichmäßig verteilt. In Abb. 5 folgt die Zusammenstellung der Autokorrelationen, die auch bei der Fourieranalyse anfallen. Das typische Muster der Rössler-Reihe zeigt, daß ein Wert der Reihe mit bestimmten Werten der Vergangenheit im Rhythmus der Umlaufperiode zusammenhängt, wobei die Korrelation von positiv nach negativ innerhalb eines Umlaufs wechselt, oder daß pro Halbumlauf jeder Zusammenhang verloren geht. Praktisch ausgedrückt läßt sich die X-Koordinate der Rössler-Reihe über einen kurzen Zeitraum gut vorhersagen, es ist aber absolut unklar, was nach genau einem halben Umlauf passiert. Eine ähnlich geartete Auto-korrelationsfunktion mit augenscheinlich systematischen Oszillationen zeigen die ERS-1 Bahnvorhersagefehler, allerdings auf extrem kleinem Niveau hart an der Signifikanzschwelle.

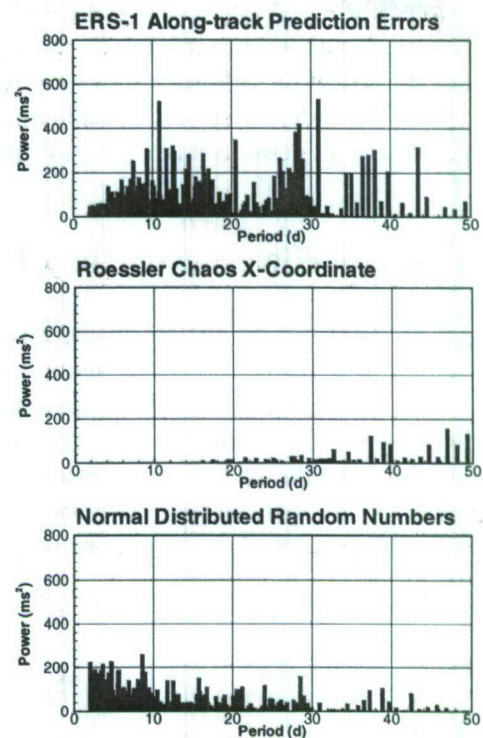


Abb. 5 Energiedichten (Zoom)

4 Die Einbettungsmethode

Die Einbettungsmethode wurde erstmals von PACKARD ET AL. (1980) und später von TAKENS (1981) veröffentlicht; RUELLE (1990) weist darauf hin, daß er diese Methode schon vorher verbal vertreten hat. Ausgangspunkt ist die Zeitreihe $\{x(t_i)\}$ mit $i=1, \dots, N$. Die $x(t_i)$ sind die Meßwerte einer skalaren Größe zu gleichmäßigen Zeitabständen Δt . Durch Wahl einer Einbettungsdimension $m > 0$ und einer Zeitverzögerung $\tau = r \cdot \Delta t$ (bei diskreten Zeitreihen wie hier ist $r \in \mathbb{N}^+$) läßt sich die Trajektorie $\{\xi_j\}$ der sogenannten Zeitverzögerungskordinaten

$$\xi_j \text{ mit } j=1, \dots, N-r(m+1)$$

im m -dimensionalen Phasenraum rekonstruieren (Gl. (2)). Eine ausführliche Diskussion über die geeignete Wahl von m und τ findet sich in ABARBANEL ET AL. (1993).

$$\xi_j = (x(t_j), x(t_j + \tau), \dots, x(t_j + (m-1)\tau)) \quad (2)$$

Somit steht ein Instrument bereit, um die Dynamik eines vermutlich mehrdimensionalen Systems der ERS-1 Bahnvorhersagefehler aus der eindimensional vorliegenden Zeitreihe erfassen und einen möglicherweise vorhandenen Attraktor graphisch aufspüren zu können. Abb. 6 zeigt eine dreidimensionale Darstellung der untersuchten Zeitreihen für eine Einbettungsdimension von $m=3$ und eine Zeitverzögerung von $\tau=1d$. Tatsächlich hätte die Zeitverzögerung nach den zitierten Maßgaben größer gewählt werden sollen. Eine zu kleine Zeitverzögerung macht sich in zigarrenförmig verzerrten Darstellungen bemerkbar wie im Falle des Rössler-Chaos, dennoch kommt der Rössler-Attraktor bereits recht deutlich zum Vorschein.

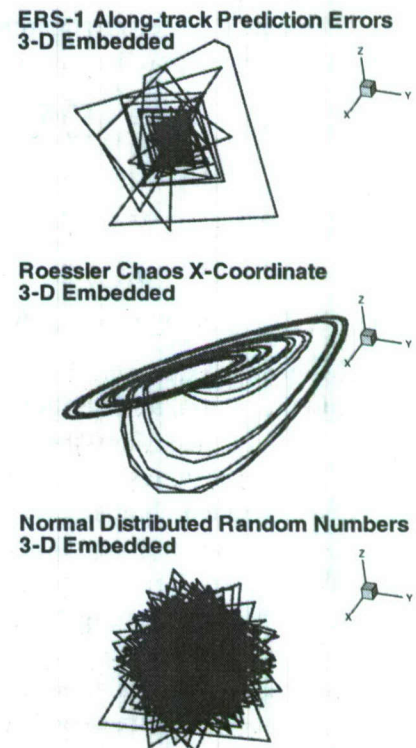


Abb. 6 Eingebettete Zeitreihen

Der Versuch, einen Attraktor für die ERS-1 Bahnvorhersagefehler zu finden, schlägt fehl. Auch bei Variation von τ über einen großen Bereich ergibt sich keine wesentliche Änderung oder eine bekannt erscheinende Struktur. Mögliche Ursache ist, daß ein Attraktor, falls vorhanden, die anschauliche Dimension 3 übersteigt. Sicher ist, daß kein Zufallsprozeß vorliegt, der ein typisches Wollknäuelbild erzeugt, wie es bei der normalverteilten Zufallszahlenreihe zu sehen ist.

5 Grassberger/Procaccia Chaobewertungen

GRASSBERGER, PROCACCIA (1983a,b) haben die Berechnung der Korrelationsdimension dargestellt und damit einen praktikablen Weg zur quantitativen Beurteilung seltsamer Attraktoren geschaffen. Die Korrelationsdimension ist ein Maß, das aus der Korrelation zufälliger Punkte auf einem Attraktor berechnet wird. Nun folgt zwar für deterministisches Chaos per definitionem, daß anfänglich nah beieinander liegende Punkte sich mit der Zeit exponentiell voneinander entfernen, also dynamisch unkorreliert sind, aber alle Punkte liegen auf dem Attraktor und sind somit räumlich korreliert. Die räumliche Korrelation wird mit dem Korrelationsintegral $C(l)$ gemessen, das wie folgt definiert ist:

$$C(l) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \cdot (\text{Anzahl der Paare } (i,j), \text{ deren Abstand } |\xi_i - \xi_j| \text{ kleiner als } l \text{ ist}) \quad (3)$$

Für kleine l verhält sich

$$C(l) \sim l^v \quad (4)$$

mit der Korrelationsdimension v als Maß für die lokale Struktur des seltsamen Attraktors. Zu v gelangt man aus der Zeitreihe $\{x(t_i)\}$, $i=1, \dots, N$ durch folgende Vorgehensweise:

- τ und m wählen
- $x(t_i)$ einbetten \Rightarrow Zeitverzögerungskordinaten ξ_j
- Korrelationsintegral berechnen:

$$C_m(l) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^N \theta(l - |\xi_i - \xi_j|) \quad (5)$$

mit

$$\begin{aligned} \theta(l - |\xi_i - \xi_j|) &= 0, \quad \text{falls } l - |\xi_i - \xi_j| < 0 \\ \theta(l - |\xi_i - \xi_j|) &= 1, \quad \text{falls } l - |\xi_i - \xi_j| > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

- $\log C_m(l)$ gegen $\log l$ auftragen

Der sogenannte Skalierungsbereich, die Selbst-ähnlichkeit eines Attraktors bei Betrachtung desselben unter verschiedenen Maßstäben, bildet sich bei Variation der Einbettungsdimensionen als eine Schar paralleler Geraden ab, deren Steigung gleich v ist. Abb. 7 zeigt die Log-Log-Graphiken zu den drei Zeitreihen für eine Zeitverzögerung von $\tau=4d$. Gera-

dezu ideal stellt sich das Ergebnis beim Rössler-Attraktor dar, demgegenüber stehen die mit zunehmender Einbettungsdimension stets steiler werdenden Graphen der Zufallszahlen. Deterministisches Chaos und zufälliges System sind somit eindeutig zu trennen. Die ERS-1 Bahnvorhersagefehler liefern ein Bild, das einen Skalierungsbereich vermuten läßt, allerdings weichen die Kurven relativ stark von einem geraden Verlauf ab. Variation der Zeitverzögerung von $\tau=3d$ bis $\tau=15d$ liefert ähnliche Bilder wie Abb. 7.

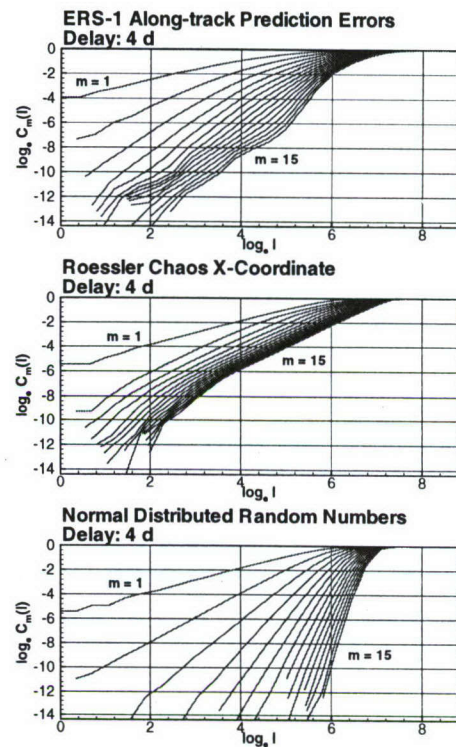


Abb. 7 Korrelationsintegrale

Aus den Log-Log-Graphiken lassen sich die Steigungen und damit die Korrelationsdimension v entnehmen. In Abb. 8 sind die diskreten Steigungen dargestellt. Typisch für deterministisches Chaos ergibt sich ein klar abgebildetes Plateau im Fall der Rössler-Reihe und der Wert für v kann mit 1.8 für die gewählte Zeitverzögerung scharf abgelesen werden. Wie bereits erwähnt, nehmen die Steigungen im Fall der Zufallszahlen mit zunehmender Einbettungsdimension zu. Auch in dieser Form der Darstellung sind deterministisches Chaos und zufälliges System eindeutig unterscheidbar. Eine erkennbare, wenngleich verrauschte Plateaustruktur ergibt sich auch für die ERS-1 Bahnvorhersagefehler. Somit könnte eine Schätzung für die Korrelationsdimension im Bereich 2 bis 3 abgegeben werden. Die Größe der Unsicherheit verbietet jedoch eine Aussage auch etwa der Form, daß hier eine fraktale Dimension und somit deterministisches Chaos vorliegt.

Eine genauere Bestimmung der Steigung kann dadurch erfolgen, daß die Kurven in Abb. 7 einer linearen Regression unterzogen werden. In diesem Fall erhebt sich dann die Frage, welche Punkte von der Regression ausgeschlossen werden sollen oder müssen. Kritisch sind sicher die Punkte am vorderen und hinteren Ende. Die vorgegebene Auflösung der Werte der Zeitreihe bestimmt den minimalen Suchabstand l im Korrelationsintegral und somit das vordere Ende. Das hintere Ende wird erreicht, wenn der Suchabstand die maximale Ausdehnung des Systems im Phasenraum erreicht. Dann fallen die Abstände aller Punktepaare unter den Suchabstand und das Korrelationsintegral ergibt sich zu 1. Die Auswahl eines geeigneten Regressionsbereiches fällt deshalb insgesamt gesehen nicht so leicht.

Für eine korrekte Rekonstruktion eines Attraktors muß die Einbettungsdimension m in jedem Fall größer als die Attraktordimension sein. In der Praxis wird deshalb m so variiert, bis die Steigungen v für große m gegen die endgültige Korrelationsdimension konvergieren. Abb. 9 faßt das Ergebnis für die drei untersuchten Zeitreihen für alle Variationen der Zeitverzögerungen zusammen. Tatsächlich tritt im Fall der Rössler-Reihe sehr schnell ab einer Einbettungsdimension von 4 eine Sättigung ein. Die Korrelationsdimension ist mit ca. 2.3 scharf ablesbar. Bei der Zufallszahlenreihe hingegen folgen die Graphen der Winkelhalbierenden, eine Sättigung ist nicht zu erwarten. Auch nimmt mit zunehmender Einbettungsdimension die Genauigkeit der Ergebnisse ab. Erneut können deterministisches Chaos und zufälliges System eindeutig auseinandergehalten werden. Ein nicht so deutliches Ergebnis findet sich für die ERS-1 Bahnvorhersagefehler: ab einer Einbettungsdimension von 9 und bei höheren Zeitverzögerungen kann ein Grenzwert für die Korrelationsdimension von ca. 3.4 abgelesen werden. Mit diesem Resultat kann quantitativ ein Hinweis

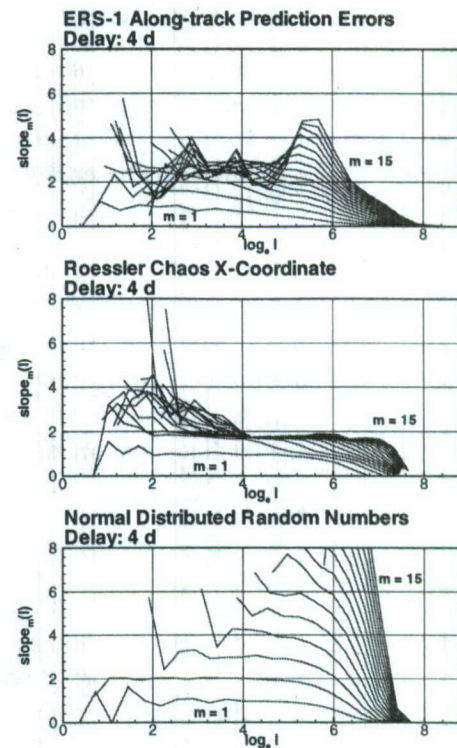


Abb. 8 Steigungsgraphik

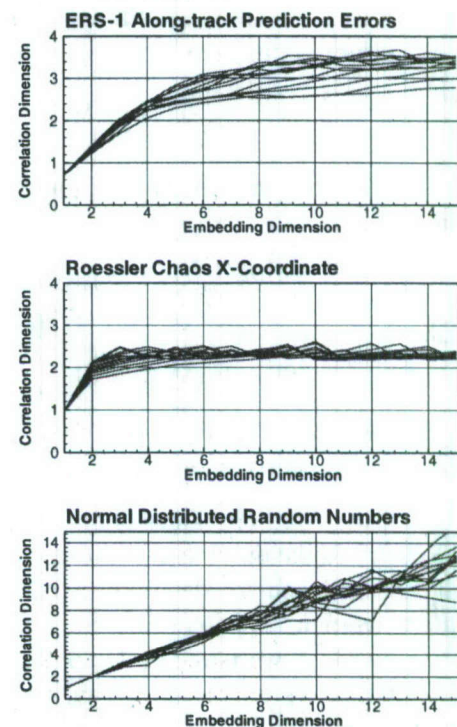


Abb. 9 Korrelationsdimension

auf das Vorliegen deterministischen Chaos konstatiert werden.

Eine weitere Methode zur Quantifizierung von Chaos liefern GRASSBERGER, PROCACCIA in (1983c). Eine Schätzung der sogenannten Kolmogorov-Entropie K , die den mittleren Verlust an Information pro Zeiteinheit in einem dynamischen System beschreibt, kann aus einer experimentellen Zeitreihe wiederum mit Hilfe der Einbettung im Phasenraum gewonnen werden. Die Maßzahl K gibt folgende Auskunft:

$$K = 0 \quad \dots \quad \text{Deterministisches System}$$

$$K = \infty \quad \dots \quad \text{Zufall}$$

$$0 < K < \infty \quad \dots \quad \text{Deterministisches Chaos}$$

Am Rande erwähnt sei folgende interessante Analogie in der Ausgleichsrechnung, die bei der technischen Behandlung von Zusatzparametern s als zusätzliche Beobachtungen (z.B. EBNER, 1973) auftritt. Dort wird mit der Wahl der Gewichtsmatrix oder der Varianz-Kovarianzmatrix Σ die Eigenheit der zusätzlichen Ausgleichungsparameter gesteuert:

$$\Sigma_{ss} = 0 \quad \dots \quad \text{Konstanten}$$

$$\Sigma_{ss} = \infty \quad \dots \quad \text{Freie Parameter}$$

$$0 < \Sigma_{ss} < \infty \quad \dots \quad \text{Stochastisch eingegrenzte Parameter}$$

Wird dann die Lösung des Ausgleichungsproblems als ein diskreter Zeitschritt in einem dynamischen System verstanden, folgt die Interpretation: Konstanten sind, nomen est omen, vorgegeben, es gibt keinen Informationsverlust; für die freien Parameter liegt keine Information über den kommenden Zustand vor; in allen Fällen dazwischen gibt es eine nicht anschauliche Vorstellung darüber, was kommt oder anders ausgedrückt, das Ergebnis ist nicht exakt vorhersagbar, es geht Information verloren.

Doch zurück zu GRASSBERGER, PROCACCIA, die die Größe K_2 einführen, für die gilt:

$$K_2 \geq 0$$

$$K_2 \leq K$$

Mit den oben gewonnenen Korrelationsintegralen berechnet man

$$K_{2,m}(l) = \frac{1}{\tau} (\log C_m(l) - \log C_{m+1}(l))$$

und sucht

$$\lim_{m \rightarrow \infty, l \rightarrow 0} K_{2,m}(l) \sim K_2$$

durch Auftragen von $K_{2,m}$ gegen m . Abb. 10 zeigt das Ergebnis für die untersuchten Zeitreihen.

Auch bei dieser Methode kann ohne Anstrengung für die Rössler-Reihe durch einen Grenzwert größer als Null das Vorliegen von deterministischem Chaos konstatiert werden. Die Zufallszahlenreihe zeigt dagegen kein Grenzwertstreben. Die ERS-1 Bahnvorhersagefehler verhalten sich ähnlich wie die Rössler-Reihe mit einem Grenzwert größer als Null, wenn auch nicht so hervorgehoben. Insgesamt könnte deshalb durchaus die ERS-1-Reihe als beobachtete Ausgabegröße eines chaotischen Systems betrachtet werden.

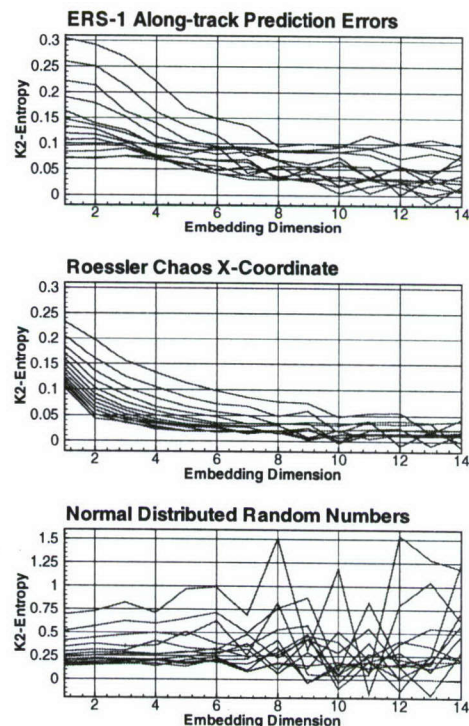


Abb. 10 K_2 -Entropy

6 Zusammenfassung

Die Chaostheorie hat erfolgreich in eine Reihe von geowissenschaftlichen Werken Einzug gehalten. Insbesondere die Methoden von GRASSBERGER, PROCACCIA auf der Grundlage der Einbettungsmethode haben es ermöglicht, eine Chaobewertung für empirische Zeitreihen durchzuführen. In obigem Beitrag wurden diese Tools implementiert und anhand von eindimensionalen Zeitreihen als Beobachtungsgröße bekannter chaotischer und zufälliger Systeme getestet und validiert. Gleichzeitig wurden die Ergebnisse einer neu zu untersuchenden, real gemessenen Zeitreihe gegenübergestellt. Die Graphiken liefern eine anschauliche Möglichkeit, die zugrundeliegenden Systeme hinsichtlich ihrer zufälligen oder chaotischen Natur zu bewerten. Die gewonnenen Ergebnisse unterstreichen die Möglichkeit, die ERS-1 Bahnvorhersagefehlerreihe als Ausdruck eines chaotischen Systems zu betrachten. In der Anwendung bedeutet dies, daß die ERS-1 Bahnvorhersagefehler nur über kurze Zeiträume extrapoliert werden können. Diese Aussage kann aus Sicht einer fünfjährigen Praxis im operationellen Bahnvorhersagedienst nur bestätigt werden.

7 Literaturverzeichnis

- ABARBANEL, H.D.I., BROWN, R., SIDOROWICH, J.J., TSIMRING, L. S.: *The analysis of observed chaotic data in physical systems*. Reviews of Modern Physics, Vol. 65, No. 4, pp. 1331-1392, 1993
- EBNER, H.: *Zusätzliche Parameter in Ausgleichungen*. Zeitschrift für Vermessungswesen 98, S. 385-391, 1973
- GRASSBERGER, P., PROCACCIA, I.: *Characterization of Strange Attractors*. Physical Review Letters, Vol. 50, No. 5, pp. 346-349, 1983a
- GRASSBERGER, P., PROCACCIA, I.: *Measuring the Strangeness of Strange Attractors*. Physica 9D, North-Holland Publishing Company, pp. 189-208, 1983b
- GRASSBERGER, P., PROCACCIA, I.: *Estimation of the Kolmogorov entropy from a chaotic signal*. The American Physical Society, Physical Review A, Vol. 28, No. 4, pp. 2591-2593, 1983c
- MASSMANN, F.-H., REIGBER, CH., KÖNIG, R., RAIMONDO, J.C., RAJASENAN, C.: *ERS-1 Orbit Information Provided by D-PAF*. In: Kaldeich, B. (Ed.): Second ERS-1 Symposium - Space at the Service of our Environment, Hamburg 1993, pp. 765-770, proceedings, ESA SP-361, 1994
- NICOLIS, C., NICOLIS, G.: *Gibt es einen Klima-Attraktor?* Physikalische Blätter, Vol. 41, No. 1, pp. 5-9, 1985
- PACKARD, N.H., CRUTCHFIELD, J.P., FARMER, J.D., SHAW, R.S.: *Geometry from a Time Series*. Physical Review Letters, Vol. 45, No. 9, pp. 712-716, 1980
- ROBERTS, D.A.: *Is There a Strange Attractor in the Magnetosphere?* Journal of Geophysical Research, Vol. 96, No. A9, pp. 16,031-16,046, 1991
- RÖSSLER, O.E.: *An Equation for Continuous Chaos*. Physics Letters, Vol. 57A, No. 5, pp. 397-398, 1976
- RUELLE, D.: *Deterministic chaos: the science and the fiction*. Proceeding Royal Society London A 427, pp. 241-248, 1990
- STONE, L., SAPARIN, P.I., HUPPERT, A., PRICE, C.: *El Niño chaos: The role of noise and stochastic resonance on the ENSO cycle*. Geophysical Research Letters, Vol. 25, No. 2, pp. 175-178, 1998
- TAKENS, F.: *Detecting strange attractors in turbulence*. In: Rand, D.A., Young, L.S. (Eds.): Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics 898, pp. 366-381, Springer Verlag, Berlin, 1981

DIE GRÜNVALDER ISARBRÜCKE – EIN HISTORISCHES BAUWERK IM LICHT GEODÄTISCHER ÜBERWACHUNGSMESSUNGEN

Dipl.-Ing. Martin Lang

Institut für Geodäsie
Universität der Bundeswehr München
85577 Neubiberg

Zusammenfassung

Kurz nach der Jahrhundertwende erbaut, gilt die südlich von München gelegene Grünwalder Isarbrücke als eine der ersten Stahlbetonbrücken der Welt. Der Druck, den die Rutschmassen des westlichen Uferhanges auf die Brücke ausüben, führte bereits wenige Jahre nach Fertigstellung des Bauwerks zu ersten Schäden. Die Sprengung des Grünwalder Bogens zu Ende des zweiten Weltkrieges bewirkte eine vorläufige Entlastung. Der nach dem Wiederaufbau 1949 wieder voll auf das Bauwerk einwirkende Hangdruck führte in der Folgezeit zu einer Schiefstellung eines Hauptpfeilers. Um eine Entlastung der Brücke zu ermöglichen und zur Vermeidung weiterer (irreversibler) Schäden wurde im Sommer 1992 eine geschlossene Dehnungsfuge wieder geöffnet und erweitert. Die durch die Entlastung induzierten Bewegungen wurden mit Hilfe geodätischer Messungen bestimmt. Die anschließenden Überwachungsmessungen und gesonderte Detailuntersuchungen dauern bis zum heutigen Tag an und sind in diesem Beitrag zusammengestellt.

1 Einleitung

In den Jahren 1903/04 wurde die 10 km südlich von München gelegene Grünwalder Isarbrücke in der damals noch neuen Stahlbetonbauweise errichtet. Zwei Dreigelenkbögen mit einer Stützweite von je 70 m und einer Höhe von 12,8 m bilden das Kernstück der Brücke (Abb. 1).



Abb. 1: Die Grünwalder Isarbrücke vom Süden gesehen (HACKELSBERGER, 1981)

Der Anschluß an die Hangauffahrten erfolgt am westlichen Isarufer mit einem rund 45 m langem, vierfeldrigen Vorlandbauwerk und mit einer einfeldrigen Vorlandbrücke im Osten.

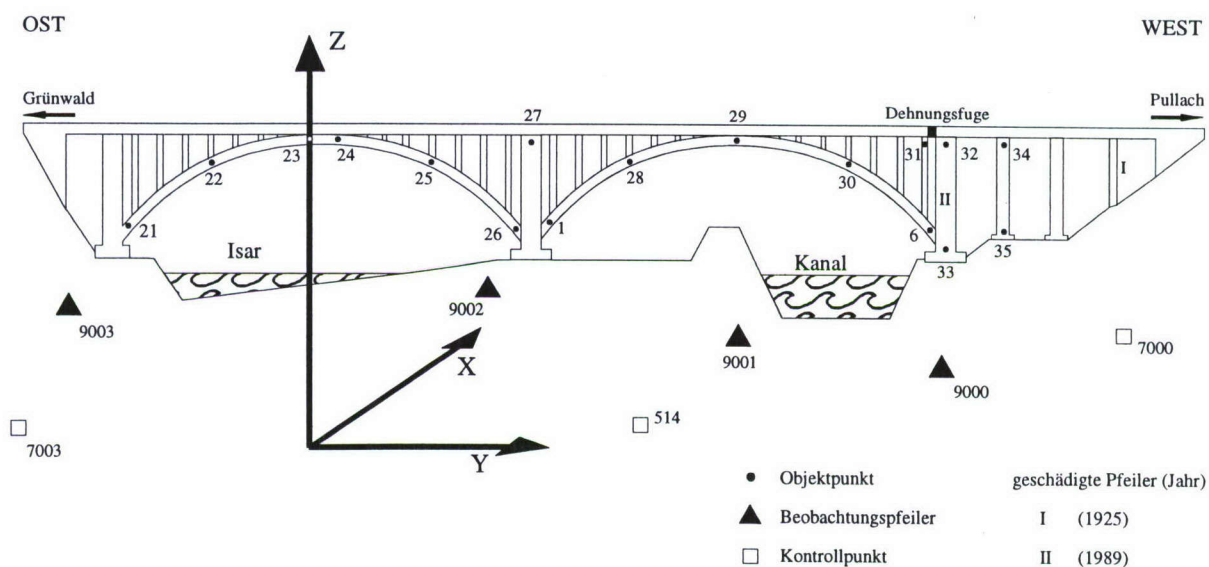


Abb. 2: Schematische Brückenansicht von Norden mit Koordinatensystem, Meßpunkten und Besonderheiten

Der Untergrund im Bereich der Grünwalder Isarbrücke setzt sich aus verschiedenen eiszeitlichen Ablagerungen unterschiedlicher Mächtigkeit und Festigkeit zusammen. Zahlreiche aktive Rutschungen

und Neuanbrüche in der näheren Umgebung weisen auf die noch nicht abgeschlossene Entwicklung der Talhänge in diesem Gebiet hin (BAUMANN, 1995). Vor allem der westliche Isarhang im Bereich der Grünwalder Brücke ist von rezenten Rutschungen betroffen.

So wurden bereits kurz nach Fertigstellung der Brücke am westlichen Vorlandbauwerk Risse und die Schiefstellung eines Pfeilers festgestellt. Eine daraufhin durchgeführte Verstärkung des Widerlagers sowie die Einbringung eines Sickerschlitzes im Jahre 1908 konnte eine weitere Schädigung jedoch nicht verhindern. Eine Überprüfung im Jahre 1925 ergab, daß das Fundament des westlichsten Vorlandpfeilers bereits eine Exzentrizität von 10 cm in Richtung Isar aufwies (Abb. 2). Nach der Geraderichtung dieses Pfeilers wurde zur Erzielung einer höheren Steifigkeit des gesamten Vorlandbauwerks dieser Stützpfiler mit dem Widerlager durch das Einbringen einer Fundamentplatte verbunden. Der Einbau von Druckgliedern zwischen sämtlichen Pfeilern und dem Widerlager diente selbigem Zweck. Um die Auswirkung des ständigen Druckes auf die Brücke zu minimieren, wurde die durchlaufenden Fahrbahnkonstruktion auf Rollenlager gesetzt und durch den Einbau von Dehnungsfugen in Einfeldträger unterteilt (MUY, 1928).

Am 30.4.1945 sprengten abziehende SS-Einheiten den Grünwalder Bogen, was zu einer Entlastung des westlichen Brückenbogens führte. Die daraus resultierende Schiefstellung des mittleren Stützpfilers von 12 cm in Richtung Grünwald (SCHMERBER und GRÖBER, 1950) konnte im Zuge des Wiederaufbaus, der 1949 vollendet wurde, beseitigt werden. Der stetige Hangdruck machte in den folgenden Jahrzehnten immer wieder kleinere Sanierungsmaßnahmen notwendig. Ende der achtziger Jahre wurden detaillierte Untersuchungen über den Zustand der Brücke und den Bauuntergrund in Auftrag gegeben. Dabei wurden größere Abweichungen von den Konstruktionszeichnungen und eine Schiefstellung des westlichen Stützpfilers von 7 cm festgestellt. Die in der Folgezeit ausgeführten Abstandsmessungen zu Meßmarken beiderseits einer Dehnungsfuge im Bereich des westlichen Stützpfilers (Abb. 2) ließen den Schluß zu, daß die Dehnungsfuge bereits zugeschoben worden war (selbst bei großen Temperaturunterschieden blieb der Abstand der Meßmarken konstant) und somit plastische Verformungen an der Brücke stattgefunden haben mußten (UNZNER, 1992). Um die Brücke zumindest bis zur Vollendung des seinerzeit diskutierten Brückenneubaus vom Hangdruck zu entlasten, wurde diese Dehnungsfuge im Sommer 1992 aufgeschnitten und erweitert. Die dabei entstehenden Bewegungen wurden durch geodätische Messungen erfaßt und dokumentiert.

2 Geodätische Messungen

2.1 Koordinatensystem, Referenz- und Objektpunkte

Zur einfacheren Darstellung der Bewegungen, die vor allem parallel zur Brückenachse zu erwarten waren, wurde als Referenzsystem ein lokales kartesisches Koordinatensystem gewählt, dessen Y-Achse mit der Längsachse der Brücke zusammenfällt, während die Z-Achse mit dem örtlichen Lot korrespondiert (Abb. 2).

Als Referenzpunkte (9000-9003) dienen vier Zwangszentrierungen, die auf Betonpfeilern vermarktet wurden. Ursprünglich nur für die Dokumentation der kurzfristigen Entlastungsbewegung der Brücke in Folge der Fugenöffnung geplant, erwiesen sich diese Pfeiler im Laufe der langfristigen Überwachungsmessungen als unbefriedigend. Der Pfeiler 9000 liegt noch im Wirkungsbereich der rezenten Rutschung des westlichen Uferhanges und hat sich bis heute ca. 7 mm in Richtung Isarkanal verschoben. Der Pfeiler 9001 mußte aufgrund örtlicher Gegebenheiten in eine Dammböschung gelegt werden; er hat sich während des über fünfjährigen Beobachtungszeitraums um mehr als 10 mm hang-

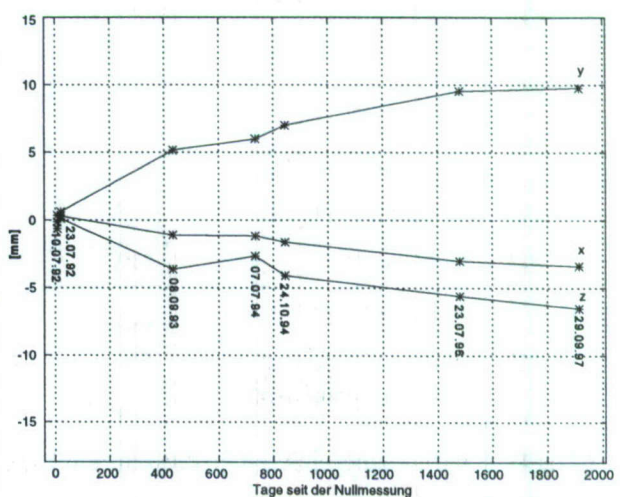


Abb. 3: Bewegung des Meßpfeilers 9001

abwärts in Richtung Isarkanal bewegt (Abb. 3). Der auf einem scheinbar stabilen Nagelfluhsporn gegründete Pfeiler 9003 rutschte währenddessen um knapp 10 mm in Richtung Isar.

Unter diesen Umständen - lediglich ein Stützpunktpfeiler (9002) kann als stabil angesehen werden - scheiden statistische Verfahren zur Ermittlung von Referenzpunktverschiebungen aus. Die Datumsfestlegung für alle nachfolgenden Untersuchungen mußte daher pragmatisch erfolgen und basiert auf a priori Kenntnissen über die Stabilität des geologischen Untergrundes: Der Pfeiler 9002 wurde in allen drei Koordinatenkomponenten fixiert, während vom Pfeiler 9000 nur die X-Komponente festgehalten wurde. Die seit den Meßepochen "9401" bzw. "9505" (Tab. 1) zur Kontrolle mitbeobachteten Punkte 514, 7000 und 7003, die als stabil angesehen werden können (514) bzw. deren Absolutbewegungen bestimmbar sind (7000 und 7003), bestätigen die Richtigkeit der Datumsverfügung: Ihre scheinbaren Bewegungen der Kontrollpunkte liegen im Bereich des Meßrauschens.

Nachdem sich die Instabilität des ursprünglichen Referenzsystems bereits frühzeitig abzuzeichnen begann, wurde im Juni 1994 mit Hilfe von GPS eine Rückversicherung in geologisch stabilen Gebieten durchgeführt. Hierzu wurde auf den Punkten 514, 9000 und 9001 (der Punkt 9002 ist nur beschränkt GPS tauglich; der unter Bäumen liegende Punkt 9003 hingegen gänzlich ungeeignet) und vier neuen Punkten je zwei zweistündige simultane GPS-Beobachtungen durchgeführt. Aus der Ausgleichung der doppelt beobachteten Basislinien lassen sich Punktgenauigkeiten in der Lage von 2,5 mm und in der Höhe von 5,5 mm ableiten. Die Verschiebungsbeträge der Beobachtungspfeiler seit dieser Messung betragen maximal 6 mm, so daß eine Überprüfung der Pfeiler 9000-9002 mittels GPS noch nicht zur Kontrolle der getroffenen Datumsverfügung herangezogen werden kann.

Punktbestimmungen im Millimeterbereich sind nur mit Hilfe von präzise definierten Zielen möglich. Die bereits am Pullacher Bogen vorhandenen Meßbolzen erwiesen sich fast alle als ungeeignet, lediglich die nahe dem Bogenende gelegenen Punkte 1 und 6 (Abb. 2) konnten weiterverwendet werden. Alle anderen Punkte (21-26 am Grünwalder Bogen, 27-35 am Pullacher Bogen und Vorlandbauwerk) wurden mit in der Industrievermessung üblichen Zielmarken neu vermarkt.

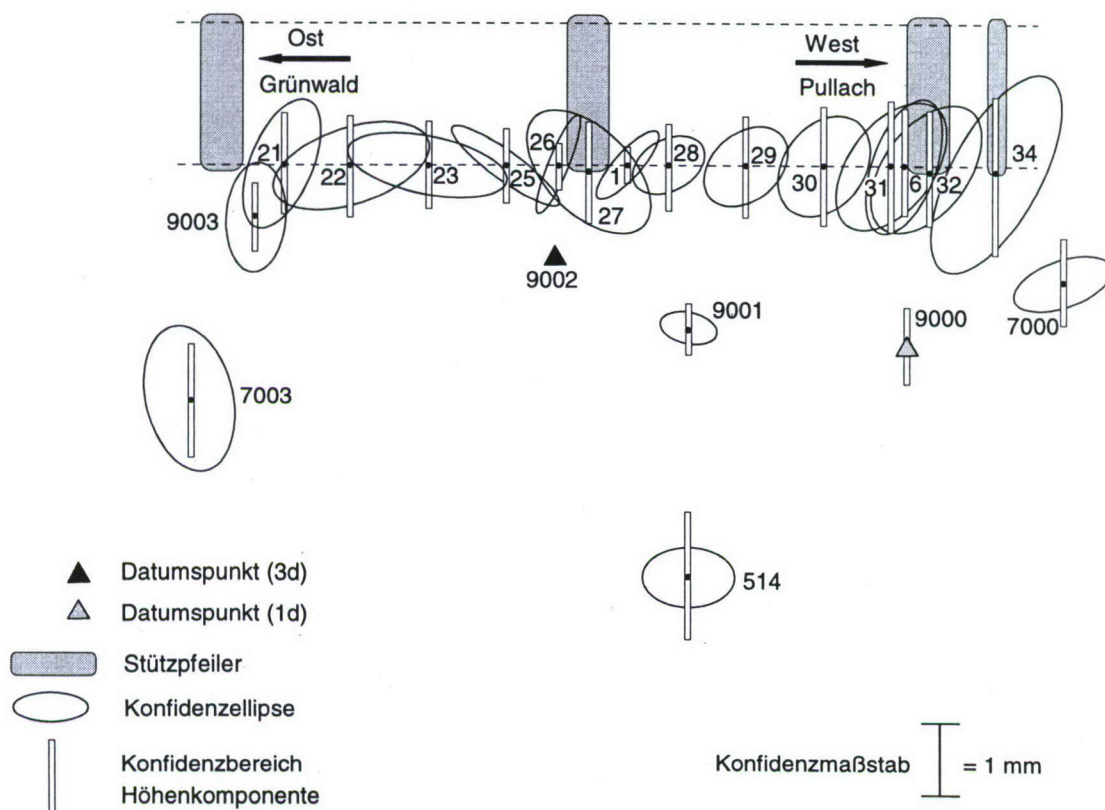


Abb. 4: Konfidenzbereiche ($\alpha = 0,05$) für die Lage- und Höhenkomponente der Punkte in der Meßepoche "9701"

2.2 Instrumentarium und Metrologie

Die Bestimmung der Objektpunkte erfolgte mittels räumlichen Vorwärtseinschneidens, wobei fast alle Objektpunkte von drei Meßpeilern, in Einzelfällen gar von allen vier Meßpeilern aus beobachtet werden konnten. Die Beobachtung der Horizontalrichtungen und Vertikalwinkel erfolgte mit den Präzisionstheodoliten WILD T2002 und T3000 ($\sigma_{Hz} = \sigma_v = 0,15$ mgon (LEICA, 1993)); zur Streckenmessung zwischen den Meßpeilern wurde der elektrooptische Entfernungsmesser WILD DI 2002 ($\sigma_s = 1,0$ mm + 1 ppm (LEICA, 1993)) verwendet. Die der Standardabweichung der ausgeglichenen Punktkoordinaten liegt in der Regel unter 1 mm. In Abb. 4 ist die Genauigkeitssituation für die Meßepoche "9701" wiedergegeben. Die Konfidenzbereiche der Pfeilerpunkte 33 und 35 sind nahezu identisch jenen der korrespondierenden Punkte 32 und 34 an der Kopfseite der Pfeiler und sind zur besseren Übersicht nicht in Abb. 4 dargestellt.

Nach dem Öffnen der Dehnungsfuge in der Nacht vom 8./9.7.1992 wurden insgesamt 17 Folgemessungen durchgeführt. Dabei wurde in 8 Epochen die gesamte Brücke, in drei weiteren nur der Pullacher Bogen beobachtet, während sechs Epochen nur der Ausmessung des Referenzsystems vorbehalten waren (Tab. 1).

Im Rahmen einer Diplomarbeit (VON BONIN und HEIDEN, 1994) wurden alle bis dato vorliegenden Meßepochen in verschiedenen Varianten ausgewertet. Unter Annahme eines Kongruenzmodells für die Deformationsanalyse (WELSCH, 1996) wurden einerseits ein strenger Mehrepochenvergleich (NIEMEIER, 1984) und andererseits ein sukzessiver Zweiepochen- bzw. Folgeepochenvergleich durchgeführt. Alle Berechnungen hierzu wurden mit dem Programmpaket PANDA, Version 1.3 (GEOTEC, 1992) durchgeführt. Hierbei zeigte sich, daß die Auswertestrategien gleichwertige Resultate - die Ergebnisse differieren um maximal 1 mm - liefern.

Die akribische Analyse aller Resultate führte in Kombination mit der Kenntnis der örtlichen Gegebenheiten zu der bereits erwähnten Datumsverfügung für das Referenzsystem. Die Verschiebungsvektoren können aufgrund des gewählten Koordinaten- und Referenzsystems durch einfache Differenzenbildung gewonnen werden.

Eine Eigenwert-/Eigenvektoranalyse zeigt darüber hinaus, daß, wie zu erwarten, das Netz in lokaler X-Richtung (d. h. senkrecht zur Brückenachse) am schlechtesten bestimmt ist, während die interessierenden lokalen Y-(Bewegung in Brückenrichtung) und Z-Komponenten (Höhenänderung) in etwa gleichgenau bestimmt werden können.

Jahr	1992					1993			1994			1995						1996	1997
Datum	2.7.	10.7.	23.7.	22.9.	16.12.	23.3.	29.6.	8.9.	22.6.	7.7.	24.10.	28.4.	25.5.	30.6.	26.7.	9.11.	25.11.	23.7.	29.9.
Epoche	0	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	5	6	1	1
Beob.	Uni	Uni	Uni	SBA	SBA	Uni	Uni	Uni	Uni	Uni	Uni	Uni	FH	FH	FH	Uni	FH	Uni	Uni
GB	•	—	•	—	•	—	—	—	—	•	—	—	•	—	•	—	•	•	•
PB	•	•	•	•	•	—	•	•	—	•	•	—	•	—	•	—	•	•	•
Ref.	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Kpkt.	—	—	—	—	—	—	—	—	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	—	—	(2)	—	(2)	(2)
Legende: FH = Fachhochschule München GB = Grünwalder Bogen • = beobachtet SBA = Straßenbauamt München PB = Pullacher Bogen — = nicht beobachtet Uni = Institut für Geodäsie, UniBwM Ref. = Referenzsystem (1) = Punkt 514 Kpkt. = Kontrollpunkte (2) = Punkte 514, 7000 und 7003																			

Tab. 1: Meßepochen und Meßprogramm

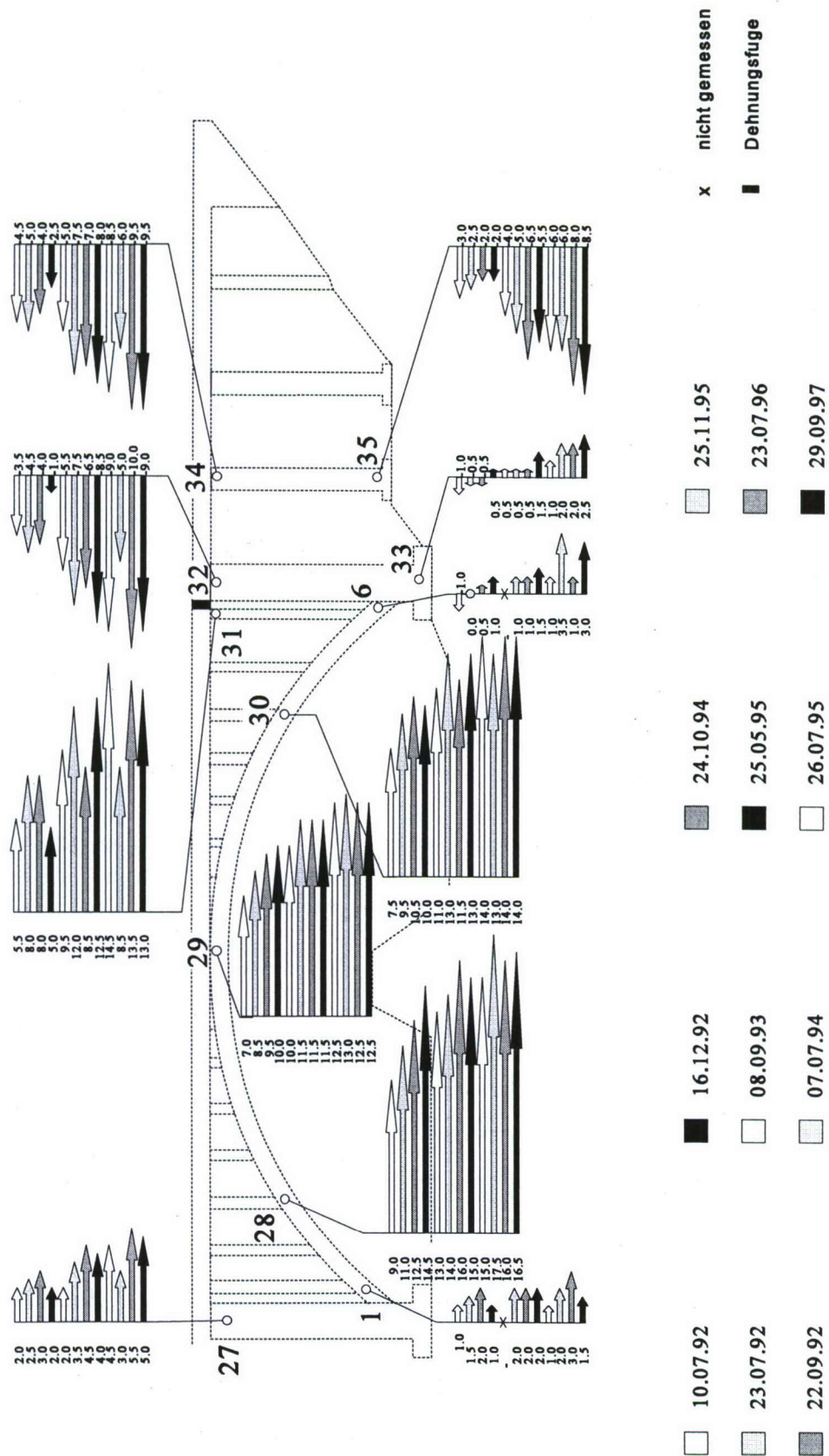


Abb. 5: Gemessene Punktbewegungen des Pullacher Bogens in Achsrichtung der Brücke

3 Ergebnisse

In Abb. 5 sind exemplarisch die geodätisch ermittelten Punktbewegungen des Pullacher Bogens in Y-Richtung dargestellt. Über die rein deskriptive Darstellung der Ergebnisse hinaus war es von Anfang an von Interesse festzustellen, inwieweit die Resultate mit den Erwartungen der Bausachverständigen übereinstimmen. Zur Simulation des Verhaltens einer Brücke unter verschiedenen Lastfällen wird in der Baustatik unter anderem ein sogenanntes Stabwerkmodell verwendet (Abb. 6). Hierbei wird das Tragwerk der Brücke durch Stäbe bekannter Geometrie, die durch Knoten unterschiedlicher Funktionalität verknüpft sind, dargestellt und mit Parametern der Baumaterialien zu einem statischen Gesamtmodell verbunden. Die geometrischen Daten der Brücke konnten einem Bestandsplan aus dem Jahre 1949, Angaben über die Materialeigenschaften einem bautechnischen Gutachten über den Zustand der Brücke (SPRINGENSCHMIDT, 1991) entnommen werden. Die Berechnungen der in den folgenden Absätzen dargestellten "theoretischen" Punktbewegungen wurden vom Lehrstuhl für Konstruktiven Ingenieurbau der Universität der Bundeswehr München durchgeführt.

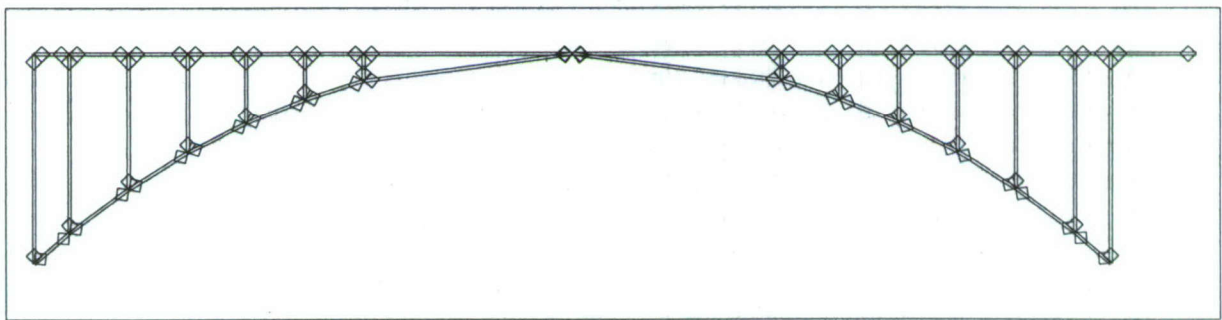


Abb. 6: Stabwerkmodell des Pullacher Bogens

3.1 Entlastungsbewegung in Folge der Fugenöffnung

Das Öffnen der Dehnungsfuge bewirkte eine Entlastung der Brücke vom Hangdruck. In Abb. 7a ist das schematische Aussehen des Pullacher Bogens sowohl unter der Einwirkung des Hangdrucks (durchgezogene Linie) als auch ohne Einwirkung einer äußeren Kraft (gestrichelte Linie) dargestellt. Die Entspannungsbewegung in den ebenfalls dargestellten Bogenpunkten wird von den schwarzen zu den weißen Punkten erwartet. In Abb. 7b sind die tatsächlich beobachteten Verschiebungen wiedergegeben.

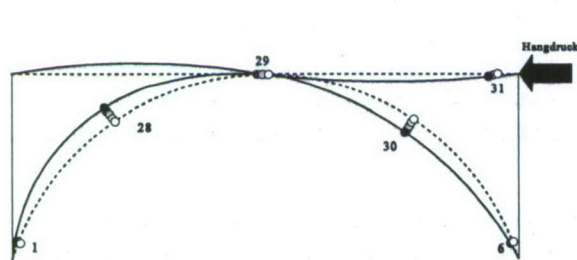


Abb. 7a: Form des Pullacher Bogens mit (—) und ohne (---) Einwirkung des Hangdrucks (ohne Maßstab)

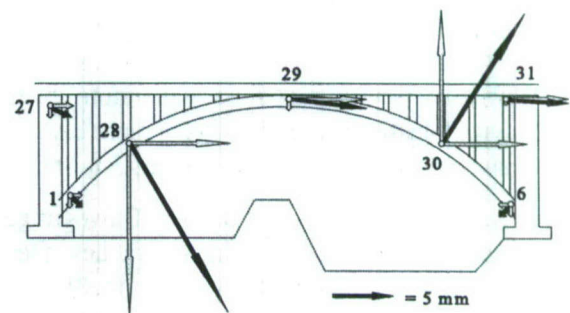


Abb. 7b: Geodätisch ermittelte Verschiebungen infolge der Entlastung vom Hangdruck (graue Vektoren = gemessene Koordinatenunterschiede, schwarze Vektoren = Resultierende)

Wie aus Tab.2 ersichtlich, kann eine Übereinstimmung der "theoretischen" Verschiebungen mit den

beobachteten nur hinsichtlich der Richtung festgestellt werden. Die aus dem Stabwerkmodell errechneten Bewegungsbeträge sind in der Regel um den Faktor 20 kleiner.

Punkt	$t_{\text{theo.}}$ [gon]	$t_{\text{beob.}}$ [gon]	$s_{\text{theo.}}$ [mm]	$s_{\text{beob.}}$ [mm]
1	151,7	150,0	0,2	1,4
6	49,3	250,0	0,2	0,7
28	152,2	166,5	0,7	17,9

Punkt	$t_{\text{theo.}}$ [gon]	$t_{\text{beob.}}$ [gon]	$s_{\text{theo.}}$ [mm]	$s_{\text{beob.}}$ [mm]
29	100,0	113,4	0,5	7,1
30	47,6	35,5	0,7	14,2
31	96,1	105,7	1,7	5,5

Tab. 2: Vergleich der aus dem Stabwerkmodell abgeleiteten mit den beobachteten Bewegungen direkt nach der Fugenöffnung (t_i = Richtungswinkel, s_i = Betrag der Verschiebungsvektoren)

Als mögliche Ursachen für diese Diskrepanz kommen Modellierungsfehler der realen Brücke, die Größe des einwirkenden Hangdrucks und die Bauwerkstemperatur in Frage. Zumindest die beiden zuletzt genannten Einflußgrößen können mit großer Wahrscheinlichkeit nicht ursächlich sein: Während des gesamten Zeitraums in den sowohl die Nullmessung am 2.7.92, als auch die Wiederholungsmessung am 10.7.92 fällt, herrschten gleiche meteorologische Bedingungen, so daß keine unterschiedlichen Bauwerks-temperaturen vorgelegen haben können. Zur Fugenöffnung wurde der entsprechende Teil der Brücke mit Hilfe von hydraulischen Pressen entlastet. Der dabei verwendete Anpreßdruck stellt eine gute Näherung des tatsächlich einwirkenden Hangdrucks dar und wurde in der Simulationsrechnung verwendet.

Die gesamte Geometrie der Brücke ist aus dem Bestandsplan von 1949 hinreichend genau bekannt, für die Materialkonstanten konnten die aktuellen Werte aus dem bautechnischen Gutachten von SPRINGEN-SCHMIDT (1991) verwendet werden. Die verbleibenden Unsicherheiten über Materialeigenschaften (z. B. die Annahme der Homogenität des Baumaterials für das gesamte Bauwerk) und Funktionalitäten im Stabwerkmodell (zutreffende Modellierung der einzelnen Bauwerkselemente in ihren gegenseitigen Relationen) können jedoch nicht zu Fehlern der genannten Größenordnung führen, so daß letztlich keine Erklärung für die beträchtlichen Abweichungen angegeben werden kann.

3.2 Verzögerte Elastizität

Entlastet man ein Betonbauwerk von einem dauerhaft einwirkenden Druck, so erfolgt zunächst eine spontane Entlastung. Der Beton bewegt sich dabei sprunghaft in Richtung seiner ursprünglichen, d.h. vor der Einwirkung des Druckes eingenommenen Lage zurück. Daran schließt sich eine exponentiell abklingende Bewegung, die sogenannte "verzögerte Elastizität" an, die aber im Falle irreversibler Schäden ("plastische Verformung") nicht bis in die Ausgangslage zurückführt. In Abb. 8 ist der gesamte Entlastungsvorgang schematisch dargestellt.

Die Beträge temperaturinduzierter Bewegungen eines Bauwerkes übersteigen in der Regel die der verzögerten Elastizität um ein Vielfaches. Deren Erfassung wird daher nur möglich sein, wenn das Temperaturverhalten des Bauwerks modelliert wird und alle Messungen auf eine einheitliche Temperatur bezogen werden können. Mit Hilfe des zuvor beschriebenen Stabwerkmodells wurden alle Beobachtungen auf eine Bauwerkstemperatur von 15° C umgerechnet. Die unkorrigierten Verschiebungswerte der Punkte 28-31 des Pullacher Bogens seit der ersten Wiederholungsmessung vom 10.7.92 sind in Abb. 9 oben, die normierten in Abb. 9 unten dargestellt.

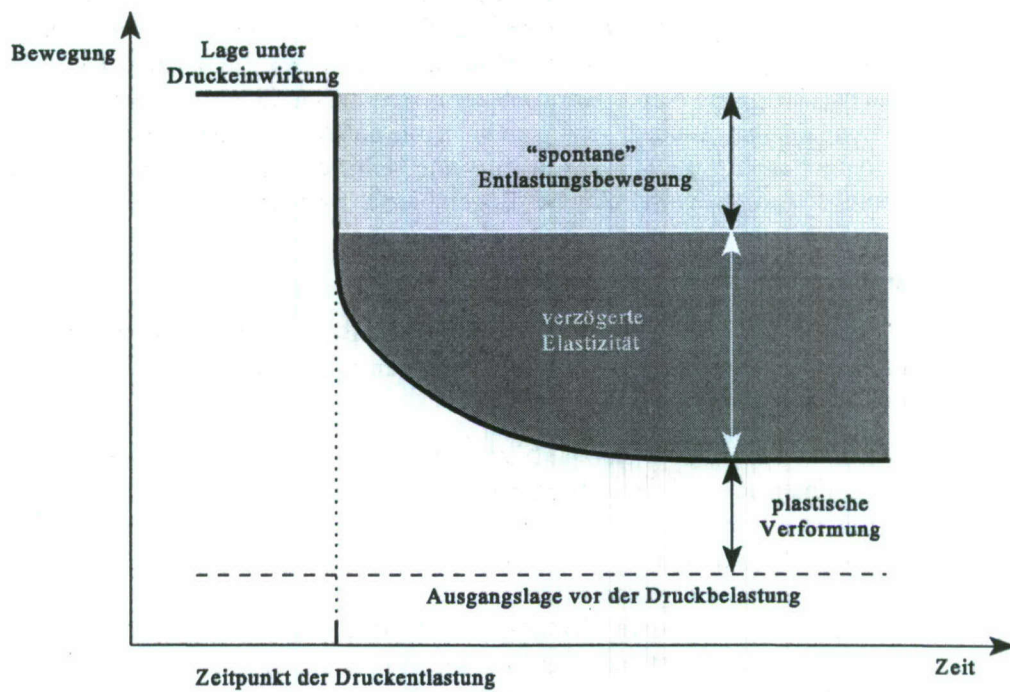


Abb. 8: Schematische Entlastungsbewegung von Beton

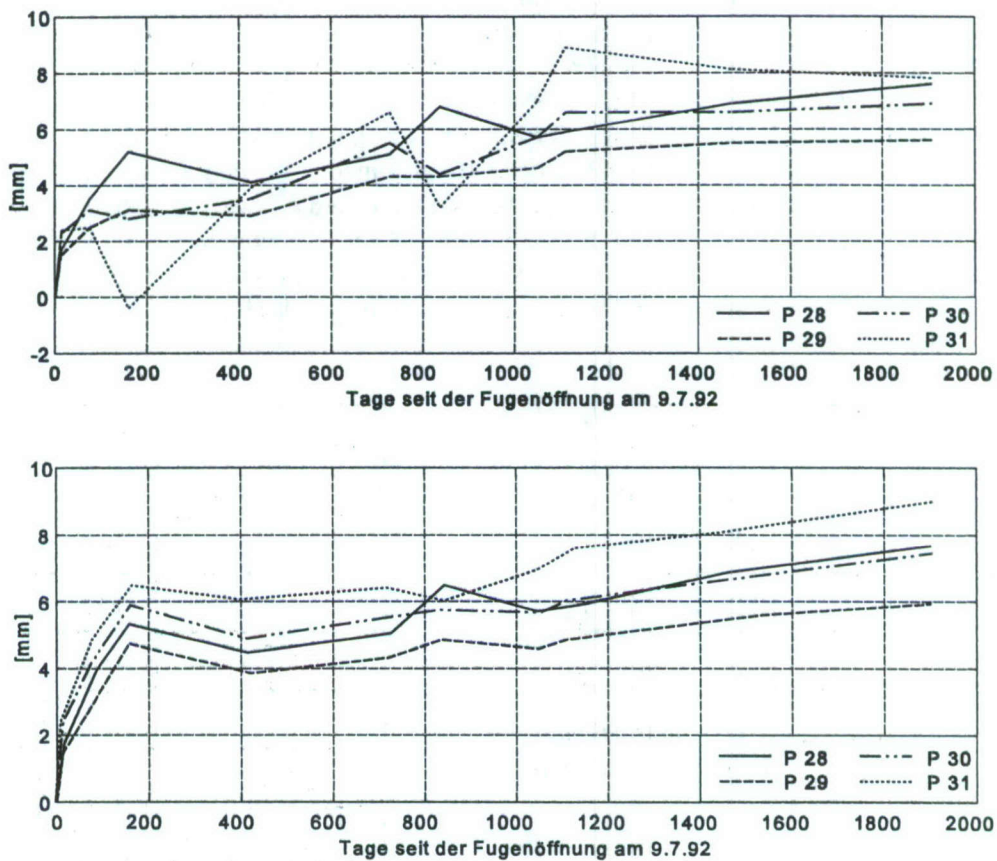


Abb. 9: Gemessene (oben) und temperaturnormierte Punktbewegungen (unten) am Pullacher Bogen

Während aus oberen Graphik in Abb. 9 lediglich der Trend, daß sich alle Punkte in Richtung Pullach bewegt haben, erkennbar ist, wird der charakteristische, exponentiell abklingende Verlauf der verzögerten Elastizität in der unteren Graphik der Abb. 9 deutlich sichtbar. Zwei Wochen nach der ersten Wiederholungsmessung beträgt die durchschnittliche Bewegung des Pullacher Bogens 2 mm, zwei Monate später 4 mm und knapp ein halbes Jahr nach der Fugenöffnung 5 mm. Dieser Wert bleibt in den folgenden 30 Monaten konstant. Danach setzt eine bis heute anhaltende lineare Bewegung ein, die mit der Theorie der verzögerten Elastizität nicht in Einklang steht. Ob die in diesen Zeitraum fallenden verstärkten Sanierungsmaßnahmen am Pullacher Bogen hierfür ursächlich ist, steht dahin.

3.3 Temperaturinduzierte Bewegungen der Brücke

Weiterführende Aussagen über das Verhalten der Brücke (z.B. Verlauf der verzögerten Elastizität) hängen wesentlich von der Güte des zur Normierung verwendeten Temperaturmodells ab. Zu dessen Überprüfung bieten sich verschiedene Indikatoren an:

- Bewegungen des Bauwerks in der Vertikalen sind nahezu ausschließlich vom Längenausdehnungskoeffizienten des Stahlbetons abhängig. Ein Vergleich von gemessenen und modellierten Bewegungen erlaubt eine einfache Überprüfung.
- Der Grünwalder Bogen ist nur in geringem Maße vom auf den Pullacher Bogen einwirkenden Hangdruck bzw. der verzögerten Elastizität nach Fugenöffnung betroffen. Der mittlere Verschiebungsbetrag von 3,5 mm in Richtung Pullach seit Fugenöffnung (davon in etwa die Hälfte direkt nach der Öffnung) bestätigt diese Aussage. Veränderung der Punktlagen im jahreszeitlichen Wechsel können daher nur temperaturinduziert sein.
- Überwachung der Breite der geöffneten Dehnungsfuge bei gleichzeitiger Erfassung der (Bauwerks-)Temperatur und ein anschließender Soll/Ist-Vergleich lassen Rückschlüsse auf die Güte des Temperaturmodells zu.

Als Grundlage für die Beurteilung des verwendeten Temperaturmodells werden für die beiden zuerst genannten Fälle die Messungen der Nullepoche vom 2.7.92 und die der vierten Wiederholungsmessung vom 16.12.92 herangezogen. Der Lufttemperaturunterschied beider Meßepochen betrug ca. 20° C. In der Regel wird der Temperaturgang eines Bauwerks geringer sein als der der Lufttemperatur, so daß für die Simulationsberechnung von einer Differenz der Bauwerkstemperaturen von 15° C ausgegangen wurde. In Tab. 3 sind die simulierten und beobachteten Bewegungen der Punkte an der Kopfseite aller Stützpfeiler der Brücke angegeben. Aufgrund der Konstruktion ist die Bewegung der Bogenpunkte in der Z-Komponente etwa eine Zehnerpotenz größer als jene in der Y-Komponente. Die Überprüfung des Temperaturmodells am Grünwalder Bogen wurde daher exemplarisch an der Z-Komponente vorgenommen. In Tab. 4 sind simulierte und beobachtete Bewegungen der Punkte des Grünwalder Bogens wiedergegeben.

Punkt	$\Delta h_{\text{theo.}}$ [mm]	$\Delta h_{\text{beob.}}$ [mm]	Diff. [mm]
27	-2,2	-1,0	-1,2
32	-2,2	-2,0	-0,2
34	-1,8	-1,5	-0,3

Tab. 3: Abgeleitete und beobachtete Höhenänderungen der kopfseitigen Stützpfeilerpunkte

Punkt	$\Delta h_{\text{theo.}}$ [mm]	$\Delta h_{\text{beob.}}$ [mm]	Diff. [mm]
21	-1,5	-0,5	-1,0
22	-11,0	-12,5	1,5
23	-16,0	-15,5	-0,5
24	-16,0	-15,5	-0,5
25	-6,5	-7,5	1,0
26	-1,0	0,5	-1,5

Tab. 4: Abgeleitete und beobachtete Höhenänderungen des Grünwalder Bogens

Die Differenzen in den Tabellen 3 und 4 liegen fast alle im Bereich der Meßgenauigkeit, so daß zum einen die Richtigkeit des Temperaturmodells festgestellt werden kann. Zum anderen wird die These, der Grünwalder Bogen sei von den deformierenden Kräften unbeeinflusst, gestützt.

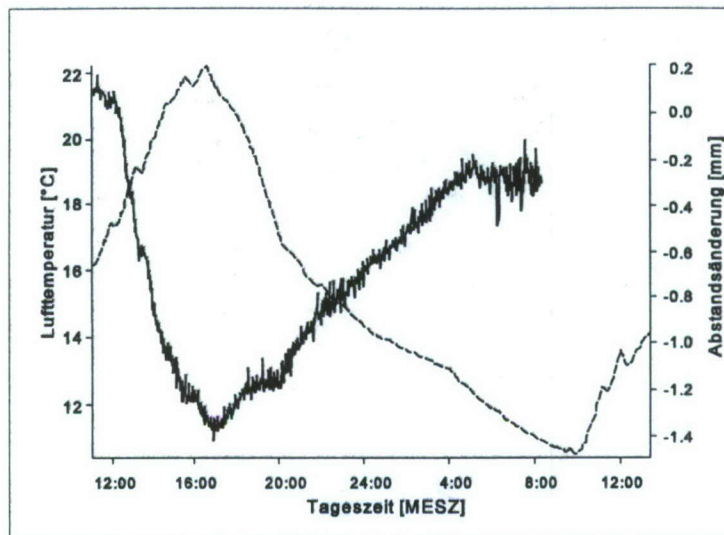


Abb. 10: Variation der Fugenbreite (—) und der Lufttemperatur (--) im Tagesgang

Im Rahmen der zuvor erwähnten Diplomarbeit (VON BONIN und HEIDEN, 1994) wurde der Versuch unternommen, die "tatsächliche" Bauwerksbewegung in Folge von Temperaturänderungen exemplarisch an der geöffneten Dehnungsfuge zu erfassen. Ein Laserabstundsmesser M5L/100 der Firma MEL (MEL, 1993) diente zur Überwachung der Weite der Dehnungsfuge. Eine zuvor durchgeführte Kalibrierung zeigte, daß unter den an der Grünwalder Brücke herrschenden Meßbedingungen die Öffnung der Fuge mit einer Genauigkeit von 0,2 mm bestimmt werden kann. Zur Erfassung der Bauwerkstemperatur wurde ein Temperaturfühler in eine Bohrung im Beton eingebracht; ein zweiter Sensor diente zur Erfassung der Lufttemperatur. Die mangelhafte Abschirmung des Meßfühlers im Beton gegen die Außenluft machte dessen Daten für eine weitere Verwendung unbrauchbar. In Abb. 10 ist daher nur die Variation der Fugenbreite und der Lufttemperatur über 24 Stunden aufgetragen. Die sehr hohe Korrelation ($k = -0,98$) der Fugenbreite mit der Lufttemperatur kommt deutlich zum Ausdruck. Eine Änderung der Lufttemperatur von 10°C bewirkt eine Änderung der Fugenweite von 1,4 mm. Aus den Simulationsberechnungen resultiert hingegen ein Wert von 4,7 mm, welcher nahezu identisch mit den 4,6 mm ist, die aus einer ähnlichen Simulation der sechziger Jahre entstammen (HELD und FRANCKE, 1967). Eine Ursache für diese Diskrepanz ist in der Tatsache zu suchen, daß aufgrund der Wärmeleitung die Bauwerkstemperatur sich deutlich langsamer als die Umgebungstemperatur ändert. Aus den vorliegenden Daten wäre der Schluß zu ziehen, daß die Grünwalder Brücke lediglich 30% der Änderung der Umgebungstemperatur aufgenommen hat. Die kurze Reaktionszeit von gut einer halben Stunde (Abb. 10) die das Bauwerk benötigt, um auf die sinkende Temperatur mit einer Verringerung der Fugenweite zu antworten, steht dazu im Widerspruch. Eine Klärung kann nur durch den Einsatz von Sensoren, die die tatsächliche Bauwerkstemperatur erfassen, erfolgen.

Eine weitere Möglichkeit zur Überprüfung des Temperaturmodells bieten Abstandsmessungen, die vom Straßenbauamt München in unregelmäßigen Abständen über einen Zeitraum von gut fünf Jahren durchgeführt wurden. In Abb. 11a sind die zum Zeitpunkt der jeweiligen Messung herrschende Lufttemperatur, in Abb. 11b die gemessenen und die mit Hilfe des Temperaturmodells normierten Fugenweiten dargestellt. Nachdem aus Messungen des geologischen Landesamtes bekannt ist (BAUMANN und GALLEMAN, 1995), daß sich die Rutschmassen im Bereich der Brücke seit längerer Zeit in einer annähernd konstanten Bewegung befinden, wurden die temperaturkorrigierten Fugenweiten im Gegensatz zu HOLLMANN, LANG, WELSCH (1994) einer linearen Regression unterzogen. Die ermittelte Regressionsgerade ist ebenfalls in Abb. 11b wiedergegeben. Die mittlere Abweichung von dieser Geraden

beträgt 1,9 mm.

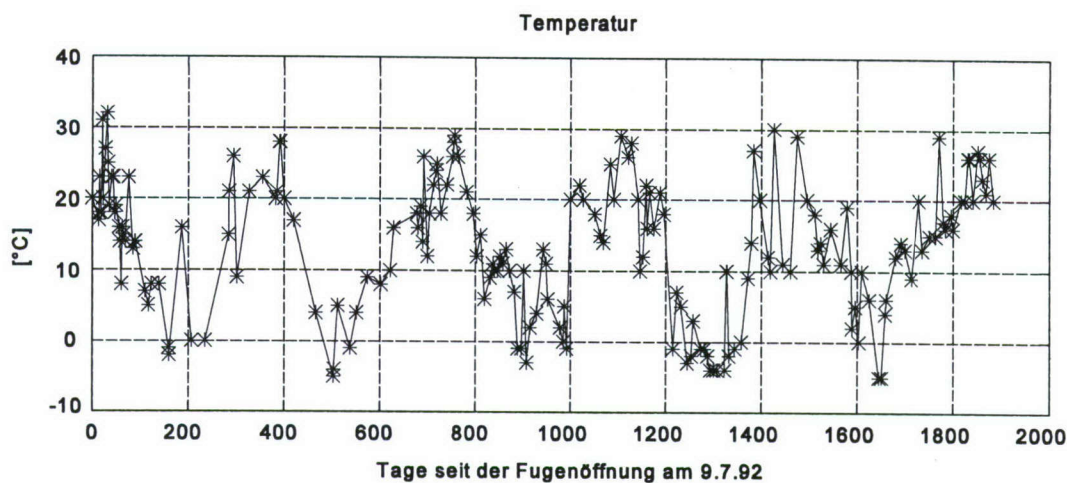


Abb. 11a: Temperaturvariation

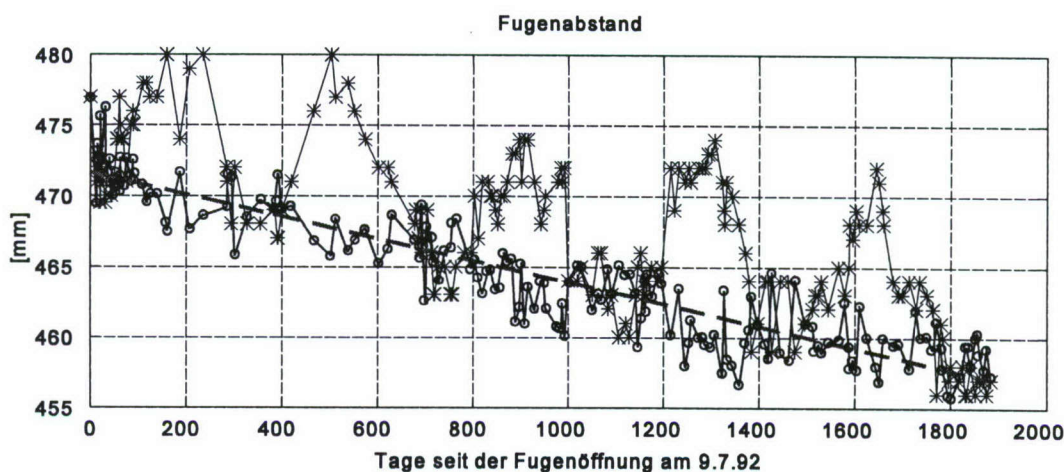


Abb. 11b: Gemessene (*) und temperaturnormierte (o) Fugenweite mit Regressionsgerade (--)

Bedenkt man noch, daß die im Normierungsprozeß verwendeten Lufttemperaturen nicht mit den tatsächlichen Bauwerkstemperaturen identisch (vgl. obige Diskussion) sind, so kann aus dieser beachtlichen Übereinstimmung zweierlei geschlossen werden: Zum einen wird das angesetzte Temperaturmodell erneut bestätigt und zum anderen wirkt die rezente Rutschung noch immer auf das westliche Vorlandbauwerk ein. Der Betrag, um den sich die Fuge schließt (ca. 3 mm pro Jahr), steht mit der vielfach postulierten durchschnittlichen Bewegung des westlichen Isarhanges im Bereich der Grünwalder Isarbrücke von 5 mm pro Jahr (z. B. SPRINGENSCHMIDT, 1991; BAUMANN und GALLEMAN, 1995) in Übereinstimmung.

3.4 Belastungstest

Seitlich des Fahrbahnkastens der Grünwalder Isarbrücke verläuft eine Hochdruckgasleitung, die in regelmäßigen Abständen mit einem Spezialfahrzeug, welches ca. 25 Tonnen wiegt, gewartet wird. Dieses Fahrzeug hält im Zuge der Wartungsarbeiten auf der für den gesamten Verkehr gesperrten Brücke an mehreren Stellen, unter anderem über einem Viertelpunkt (Punkt 28) des Pullacher Bogens. Die durch die Fahrzeuglast bewirkten Deformationen des Pullacher Bogens wurden lage- und höhenmäßig ermittelt. Hierzu wurde vor Beginn der Wartungsarbeiten die Koordinaten der drei Bogenpunkte 28-30 bestimmt. Die erneute Koordinatenbestimmung für diese Punkte während der Standzeit des Wartungsfahrzeugs über dem Viertelpunkt 28 führte zu den in Tab. 5 aufgelisteten und in Abb. 12 dargestellten Bewegungen. In Tab. 5 sind zusätzlich die mit Hilfe des Stabwerkmodells bestimmten "theoretischen"

Verschiebungen angegeben.

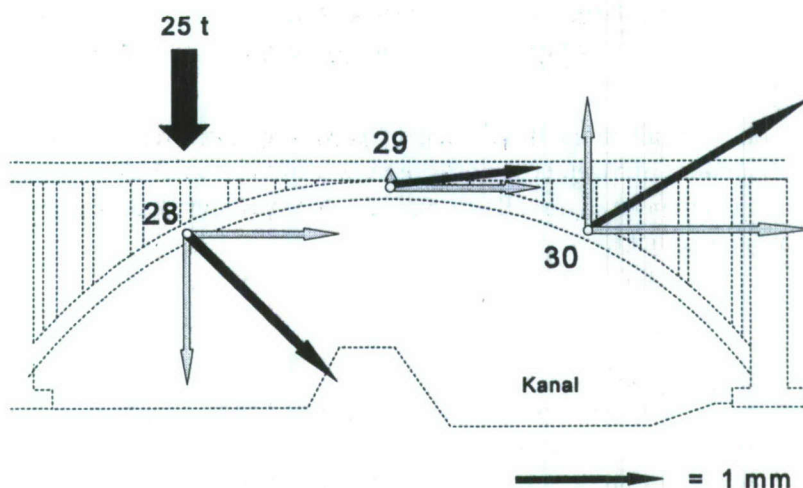


Abb. 12: Beobachtete Deformationen infolge Aufbringung einer Last von 25t über Punkt 28
(graue Vektoren = gemessene Koordinatendifferenzen, schwarze Vektoren = Resultierende)

Punkt	$dy_{\text{beob.}}$ [mm]	$dy_{\text{theo.}}$ [mm]	$dz_{\text{beob.}}$ [mm]	$dz_{\text{theo.}}$ [mm]
28	0,9	0,015	-1,1	-0,14
29	0,9	0,039	0,1	0,0
30	1,4	0,036	0,7	0,04

Tab. 5: Gemessene und berechnete Deformationen infolge der Aufbringung einer Last von 25t über Punkt 28

Wie auch schon bei der Entlastungsbewegung nach der Fugenöffnung (Kap. 3.1) bestehen erhebliche Differenzen - die beobachteten Bewegungen sind bis zu einem Faktor 60 größer - zwischen den berechneten und beobachteten Deformationen. Eine plausible Erklärung für diese Diskrepanzen war auch in diesem Fall nicht zu ermitteln. Berücksichtigt man, daß das Temperaturmodell sich als zutreffend erwiesen hat, so ist ein Fehler in der statischen Modellierung der Brücke unwahrscheinlich. Vielmehr ist zu mutmaßen, daß die dem Modell zugrunde gelegten Materialeigenschaften die Realität nur ungenügend wiedergeben und die Annahme eines homogenen Baukörpers infolge der zahlreichen Sanierungsmaßnahmen am Pullacher Bogen nicht mehr gegeben ist.

Die geodätisch ermittelten Deformationen sind in sich stimmig: Der gesamte Bogen wird infolge der Gewichtslast in Richtung des westlichen Ufers gedrückt, der Betrag der Bewegung ist in allen Punkten in etwa gleich groß. Der Drehpunkt des Dreigelenkbogens (Punkt 29) bleibt in der Höhe unverändert, während der östliche Viertelpunkt (Punkt 28) ungefähr um denselben Betrag nach unten wie der westliche Viertelpunkt (Punkt 30) nach oben gedrückt wird.

4 Zusammenfassung

Über einen Zeitraum von mehr als fünf Jahren wurden an der Grünwalder Isarbrücke unterschiedlichste Überwachungsmessungen durchgeführt, deren Ergebnisse in diesem Beitrag zusammengestellt sind.

Neben der rein beschreibenden Ergebnisdarstellung wurde versucht, die beobachteten Deformationen mit Hilfe eines statischen Brückenmodells zu berechnen und mit den geodätisch ermittelten zu vergleichen. Die aufgetretenen Differenzen liegen dabei zum Teil weit jenseits der zu erwartenden Größenordnungen, was zum großen Teil den kaum zu modellierenden, inhomogenen Materialeigenschaften des Bauwerks zuzuschreiben ist.

Weitere Erkenntnisse über das Verhalten der Brücke unter Einwirkung einer rezenten Hangrutschung werden sich voraussichtlich an der Grünwalder Isarbrücke vorläufig nicht gewinnen lassen. Das Ende der einmaligen Zeitreihe ist mit dem projektierten Baubeginn des Neubaus der Brücke im April 1998 an gleicher Stelle in greifbare Nähe gerückt.

5 Danksagung

Dem Straßenbauamt München, insbesondere den Herren C. Unzner und M. Kornprobst sei Dank für ihre Hilfe und Unterstützung bei den Messungen sowie für ihre Bereitschaft zur Diskussion und unbürokratischen Offenlegung von Hintergrundinformationen gesagt. Das Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Universität der Bundeswehr München hat freundlicherweise die Durchführung der statischen Berechnungen übernommen und bereitwillig die Fragen des statischen Laien beantwortet. Wertvolle Hinweise zur geologischen Situation im Umfeld der Grünwalder Isarbrücke wurden von Herrn Dr. H. J. Baumann von Bayerischen Geologischen Landesamt gegeben.

6 Literatur

- BAUMANN, H. J., GALLEMANN, T.: *Einwirkungen von Rutschmassen auf eine Stahlbetonbrücke über die Isar*. Schriftliche Fassung eines Vortrags, gehalten zur 10. Nationalen Tagung für Ingenieurgeologie, Freiburg, 1995.
- BAUMANN, H. J.: *Bruch- und Rutschungsvorgänge in den Tälern des Alpenvorlandes und des Schichtstufenlandes*. Beiträge aus der Geotechnik, Schriftenreihe des Lehrstuhls und Prüfungsamts für Grundbau, Boden- und Felsmechanik der TU München, Heft 21, München, 1995
- GEOtec GmbH, Bundesrepublik Deutschland: *PANDA Benutzerhandbuch. MS DOS-Version 1.3*. Laatzen, 1992. - Firmenschrift
- HACKELSBERGER, CH.: *München und seine Isarbrücken*. München: Hugendubel, 1981
- HELD und FRANCKE AG, Bundesrepublik Deutschland: *Berechnung der Fugenausdehnungen Isarbrücke Grünwald*. München, 1967 (unveröffentlicht)
- HOLLMANN, R., LANG, M., WELSCH, W.: *Geodetic Surveillance and the Dynamic Behaviour of a Bridge*. Proceedings Perelmuter Workshop on Dynamic Deformation Models, pp. 152-170, Haifa, Israel, 1994
- LEICA AG, Schweiz: *Vermessungsinstrumente*. Heerbrugg, 1993 (G1 916 d - II.93). - Firmenschrift
- MIKROELEKTRONIK GMBH, Bundesrepublik Deutschland: *Berührungslos und exakt vermessen. Produktinformation Laserabstandsmesser*. Eching b. München, 1993. - Firmenschrift
- MUY, O.: *Die Verstärkung der Landanschlüsse der Isarbrücke bei Grünwald*. Der Bauingenieur 9 (1928), Heft 12/13, S. 213-220
- NIEMEIER, W.: *Deformationsanalyse*. In: PELZER, H. (Hrsg.): *Geodätische Netze in der Landes- und Ingenieurvermessung II*, S. 559-623. Wittwer: Stuttgart, 1984
- SCHMERBER, L., GRÖBER, N.: *Der Wiederaufbau der Isarbrücke Grünwald*. Beton- und Stahlbetonbau 45(1950), Heft 3, S. 59-62

- SPRINGENSCHMIDT, R.: *Gutachten Grünwalder Brücke*. Straßenbauamt München, München, 1991 (unveröffentlicht)
- UNZNER, C.: *Persönliche Mitteilung*. München, 1992
- VON BONIN, W., HEIDEN, T.: *Analyse von Deformationsmessungen an der Isarbrücke Grünwald*. Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie, Diplomarbeit, Neubiberg, 1994
- WELSCH, W.: *Geodetic Analysis of Dynamic Processes: Classification and Terminology*. Proceedings of the 8th Int. Symposium on Deformation Measurements, Hongkong, pp. 147-156, 1996

VERKEHRSTELEMATIK WAS IST DAS? – WER BRAUCHT DAS? – WER BIETET DAS AN?

Dr.-Ing. Wolfgang Lechner
Dipl.-Geogr. Stefan Baumann

TELEMATICA
Baiernrainer Weg 6
82623 Linden
Tel. 08027/9310
Fax. 08027/9315
E-mail: telematica.wlechner@t-online.de

Zusammenfassung

Die Verkehrstelematik beschäftigt sich mit der Übertragung und Verarbeitung von verkehrsbezogenen Informationen. Dabei kommen moderne Technologien der Telekommunikation und Satellitennavigation zum Einsatz. Ziel der Verkehrstelematik ist es, das steigende Verkehrsaufkommen unter Ausnutzung des bestehenden Straßennetzes effektiver, sicherer und umweltgerechter zu gestalten. Neben den technischen Aspekten befaßt sich die Telematik auch mit den wirtschaftlichen und sozialen Auswirkungen des Verkehrs. Zu den zahlreichen Anwendungen zählen Zielführungssysteme, Flottenmanagement, Notfallruf, Verkehrsleitsysteme, Road-Pricing, Diebstahlschutz, etc.. Neue Systeme zur Verkehrsdatenerfassung sind derzeit in Erprobung und werden zukünftig die Nutzer mit flächendeckenden und aktuellen Informationen versorgen. Der Ausbau von DGPS Referenzstationen, die europäischen Pläne zu eigenen Aktivitäten im Bereich SatNav und neue, satellitengestützte Technologien der Datenübertragung werden der Verkehrstelematik neue Impulse geben, die bestehenden Anwendungen verbessern und neue Aufgabenfelder erschließen.

1 Definition und Aufgaben der Verkehrstelematik

In den letzten Jahren tauchen in der Presse immer häufiger Begriffe wie Fahrzeugnavigationssysteme, Autopilot, Flottenmanagementsystem, Verkehrsmanagementsystem, automatischer Notruf, Leitsystem u.s.w. auf, die alle aus dem Bereich der Verkehrstelematik stammen. Das Ziel dieses Beitrags ist es diese Begriffe zu erläutern und den Leser einen Überblick über die verschiedenen Anwendungsbereiche der Verkehrstelematik zu verschaffen, aktuelle Projekte, Produkte und Dienstleistungen vorzustellen und auf zukünftige Entwicklungen einzugehen.

1.1 Was ist Verkehrstelematik?

Der Begriff "Telematik" setzt sich aus den Wörtern **Tele**kommunikation und **Inform**atik zusammen. Die Telematik befaßt sich also mit dem Transport und der Verarbeitung von Informationen. Unter dem Begriff Verkehrstelematik versteht man die Erfassung, Übermittlung und Auswertung von verkehrsbezogenen Informationen.

Abbildung 1.: Begriffserläuterung "Telematik"



Intermodale Telematikansätze versuchen die verschiedenen Verkehrsträger in einem einheitlichen Konzept zu integrieren, um so z.B. die Verfolgung eines Containers während des Transportes auf Schiene, Schiff oder Straße ohne Unterbrechung zu ermöglichen, eine optimale Transportroute mittels verschiedener Verkehrsträger zu ermitteln oder einem Verkehrsteilnehmer Informationen über die Anschlußmöglichkeiten zu anderen Verkehrsmitteln zur Verfügung zu stellen. Bei der Organisation dieser Transportketten spielt die Koordination des grenzüberschreitenden Verkehrs eine immer bedeutendere Rolle.

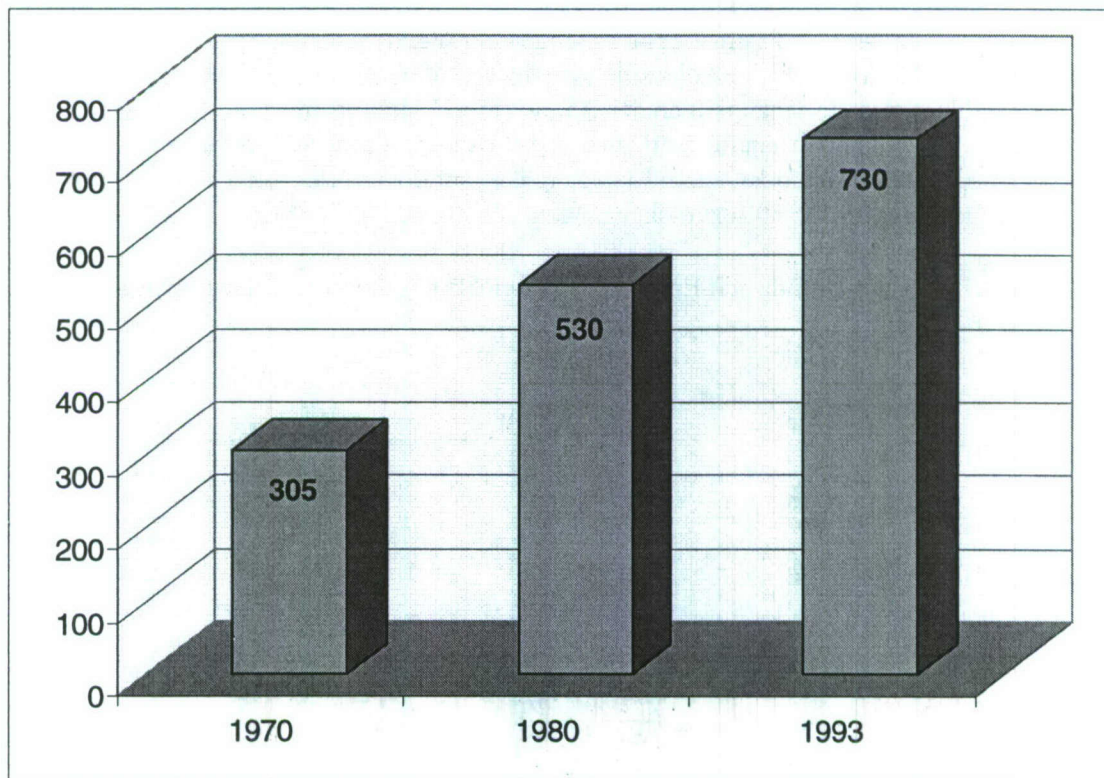
Neben den technischen Aspekten beschäftigt sich die Verkehrstelematik auch mit den **sozialen, ökonomischen und ökologischen Auswirkungen** der Verkehrssteuerung durch **IuK** (Informations- und Kommunikations) Technologien. Dazu gehören die Verringerung der negativen Auswirkungen des Verkehrs auf die Umwelt, der Wandel des Mobilitätsverhaltens innerhalb der Gesellschaft und die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit im Personen- und Güterverkehr.

Zusammenfassend läßt sich die Verkehrstelematik als eine intelligente Verknüpfung von Telekommunikation und Informatik und deren Anwendung im Verkehrswesen definieren.

1.2 Warum brauchen wir Verkehrstelematik?

Das Verkehrsaufkommen ist in den letzten Jahrzehnten enorm angestiegen und ein Ende dieser Entwicklung ist nicht abzusehen. Die Zunahme im Bereich des Individual-PKW-Verkehrs ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Mit einer weiteren Zunahme ist zu rechnen, so sagen z.B. die Prognosen bis 2010 einen Anstieg des Güterverkehrs um 78% und des Personenverkehrs um 32% voraus. Beim Transitverkehr durch Deutschland wird für den Güterverkehr eine Verdopplung, beim Personenverkehr sogar eine Verdreifachung erwartet. " (G. Müller, G. Hohlweg; 1995, S.V). Die Situation in anderen europäischen Ländern ist ähnlich, wobei der Transitverkehr in Deutschland aufgrund der geographischen Lage sicherlich am höchsten ist. Die Telematik bietet Lösungsansätze um mit dieser Entwicklung Schritt zu halten.

Abbildung 2.: Zunahme des Individual-PKW-Verkehrs in der BRD in Mrd. Kilometern



(Quelle der Daten: W. ZÄNGL, 1995, S.17)

1.3 Wer ist betroffen?

Als Kunden für Telematikanwendungen kommen eine Vielzahl von Zielgruppen in Frage. Diese lassen sich in drei Hauptbereiche gliedern:

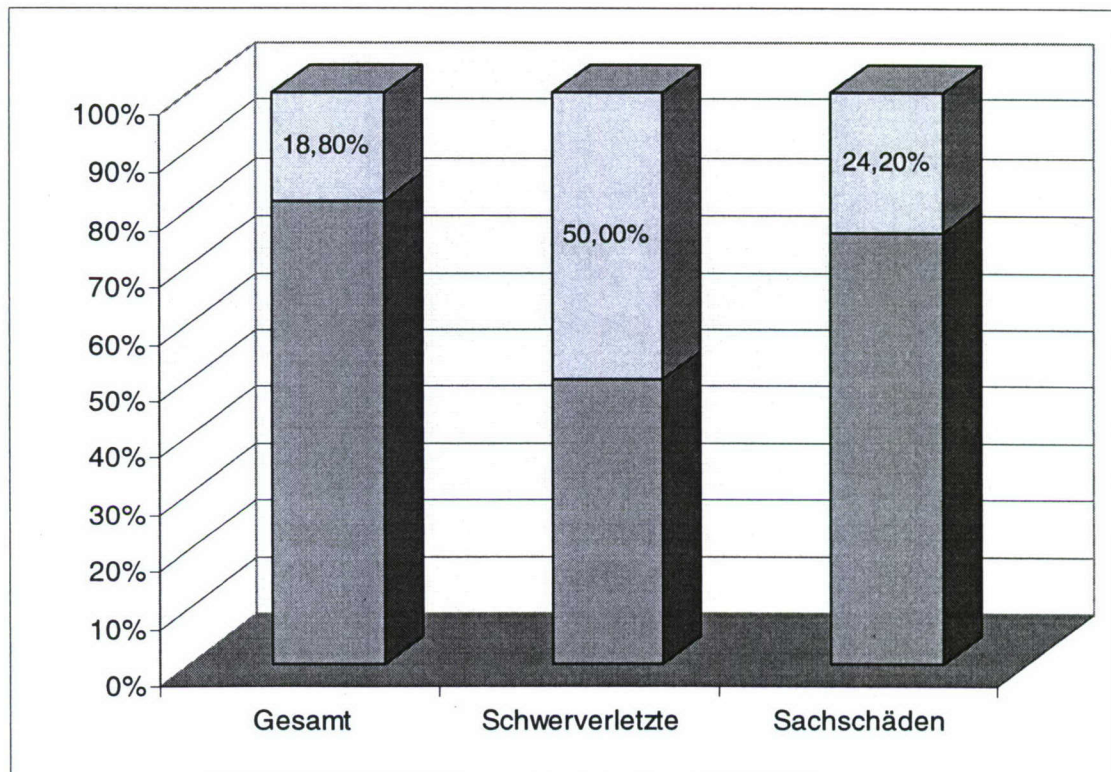
1. Die größte potentielle Nutzergruppe ist der **private motorisierte Individualverkehr**. Allein in Deutschland waren 1993 bereits 39 Mio. Personenkraftwagen zugelassen. Bis zum Jahre 2010 kann mit einem Anstieg auf 50 Mio. gerechnet werden. (G. GASSNER u.a., 1994, S.14).
2. Zu den **gewerblichen Nutzern** gehören Speditionen, Taxiunternehmen, Post, Auslieferservice, Außendienstmitarbeiter, Autovermietungen, Versicherungen (Diebstahlschutz, Überwachung der Überführung von Luxusfahrzeugen), Pannendienste, usw.
3. Auch **öffentliche Einrichtungen** kommen als Nutzer der Verkehrstelematik in Frage. Dazu gehören Feuerwehr, Rettungsdienste, Polizei, Abfallbeseitigungs- und Winterdienst oder der ÖPNV.

Jede Nutzergruppe stellt spezifische Anforderungen an die notwendigen Zentralen, Telematikendgeräte und Dienstleistungen. Dadurch eröffnet sich für Hersteller und Anbieter ein breites Marktspektrum von allgemein benötigten Geräten, Daten und Service bis zu exakt definierten Spezialanforderungen. Nachdem sich der Markt für Fahrzeugnavigationsgeräte, entsprechender Software und Dienstleistungen in den U.S.A. und Japan bereits etabliert hat, setzte in den letzten Jahren auch in Europa eine zunehmende Vermarktung ein. Dies gilt vor allem für Systeme zur individuellen Zielführung, wie sie z.B. von BMW (Carin), Mercedes (Travelpilot), Opel (Onstar), Volkswagen und Audi für Pkws der Oberklasse serienmäßig angeboten werden. In Deutschland werden derzeit 2 von 5 Fahrzeugen dieser Preisklasse mit entsprechender Navigationsausstattung verkauft.

Dienstleistungen wie die Erfassung und Verbreitung von aktuellen Verkehrslageinformationen werden durch die Systeme Passo von Mannesmann Autocom und Tegarom von Tegarom Telematics, sowie deren gemeinsamer Tochter ddg (Gesellschaft zur Erfassung von Verkehrsdaten) angeboten. Hinzu kommen eine Vielzahl von **Endgerätenherstellern** und Vertreiber von **digitalen Straßenkarten** wie zum Beispiel Teleatlas oder EGT.

Auch von staatlicher Seite werden Telematikeinrichtungen zur Verkehrsdatenerfassung betrieben. So unterhält das Bundesministerium für Verkehr eine Anzahl von Verkehrsleitsystemen z.B. an der A9 zwischen München-Nord und Holledau und an der A5 zwischen Frankfurt und Bad Homburg. Bereits heute sind mehr als 60 rechnergesteuerte Verkehrsbeeinflussungsanlagen in Betrieb und haben auf den betroffenen Streckenabschnitten zu einem Rückgang der Unfälle um ca. 30% geführt. Unfälle mit Personenschäden sind sogar um ca. 50% zurückgegangen. (G. SIEGLE, 1996, S.13).

Abbildung 3.: Rückgang der Unfälle seit Einführung der elektronischen Wechselverkehrszeichen.



(Quelle: REICHART G. in SIEGLE G., 1996, S. 204)

Um die Einsatzmöglichkeiten der Telematik für verschiedene Bereiche des Verkehrswesens zu evaluieren wurden zahlreiche Studien und Pilotprojekte in Angriff genommen. Einige der wichtigsten sollen hier erwähnt werden:

- PROMETHEUS (Programm for an European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety)
- DRIVE (Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europa)
- LISB (Leit- und Informationssystem Berlin)
- COMFORT (Cooperative Management for Urban and Regional Transport)
- STORM (Stuttgart Transport Operation by Regional Management)
- POLIS (Promoting Operational Links with Integrated Services) usw., die der Erforschung, Entwicklung und Erprobung von Verkehrstelematiksystemen dienen, setzt nun die Phase der Markteinführung und kommerziellen Nutzung ein.

In der folgenden Tabelle sind Beispiele wichtiger Telematikkunden und entsprechender Dienstleister dargestellt.

Abbildung 4.: Telematikkunden und Dienstleister.

Kunden	Anbieter (Service Provider)
Luftverkehr	Deutsche Flugsicherung
Bahn	Deutsche Bahn
ÖPNV/Regionalverkehr	Verkehrsbetriebe
Individualverkehr	Verkehrstelematikanbieter
Schifffahrt	Vessel Traffic Services
Rettungswesen	Betriebszentralen
Road Pricing	

2 Positive Auswirkungen der Verkehrstelematik

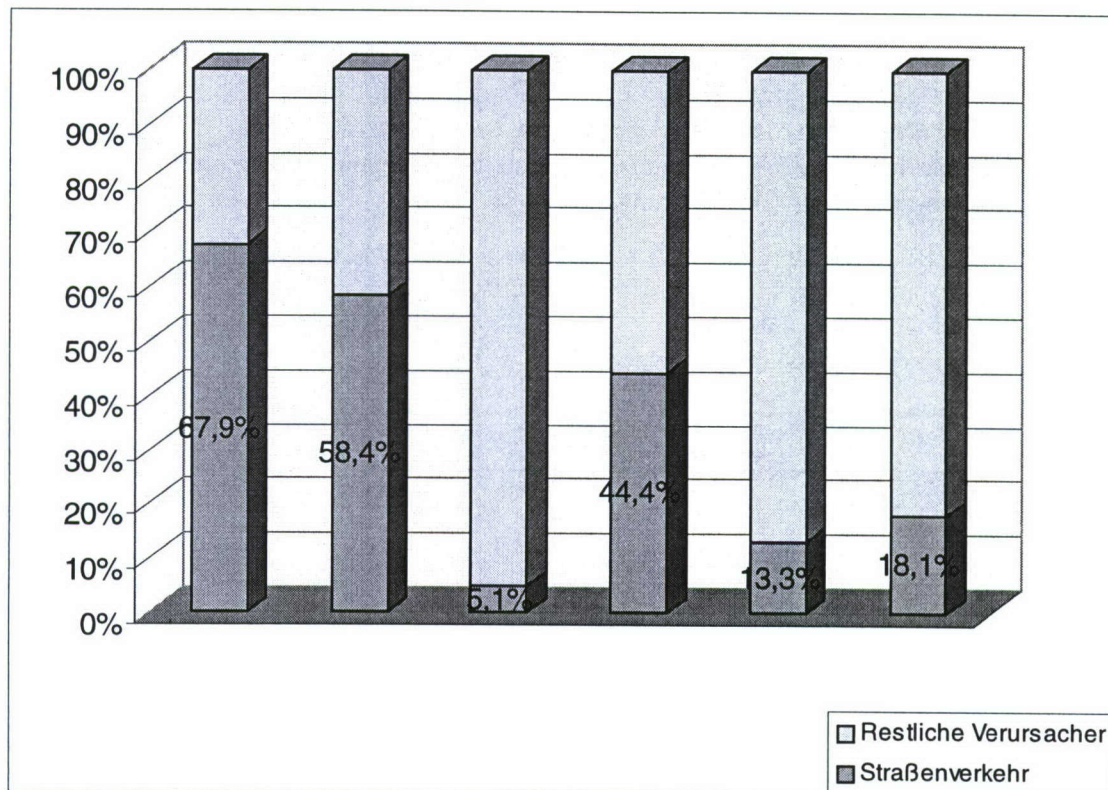
Die Anwendung moderner Telematiktechnologien verspricht positive Auswirkungen in vieler Hinsicht. Im folgenden sollen die Verbesserungen, die in den Bereichen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft erzielt werden können, behandelt werden.

2.1 Telematik und Umwelt

Ein weiterer nennenswerter Ausbau des Straßennetzes kommt wegen des enormen Flächenverbrauchs nicht in Frage, so daß sich die, aus dem erhöhten Verkehrsaufkommen resultierenden Probleme in den nächsten Jahren verschärfen werden. Dazu gehört die zunehmende Belastung der Umwelt durch die Emission von Schadstoffen.

In den letzten Jahren führte die, von den Kfz-Abgasen verursachte, Zunahme der Ozonwerte bereits mehrmals zum Auslösen von Ozonalarm und befristeten Geschwindigkeitsbeschränkungen auf einigen Straßenabschnitten. Das weltweite Ansteigen der CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre führte bereits zu einer nachweisbaren Erwärmung mit bisher kaum abschätzbaren Einflüssen auf das Klimageschehen und den Wasserhaushalt der Erde. Obwohl der Kraftstoffverbrauch und der Schadstoffausstoß durch ständig verbesserte Technologien der Automobilindustrie verringert wurde, werden die Erfolge durch die Zunahme der Anzahl von Kraftfahrzeuge und einer Erhöhung der Betriebsstunden zunichte gemacht.

Abbildung 5.: Anteil des Straßenverkehrs an den Gesamtemissionen



(Quelle: W. ZÄNGL, 1995, S.16)

Längere staubedingte Laufzeiten der Motoren und unnötige Umwege durch ortsunkundige Fahrer, sowie Leerfahrten im Güterverkehr lassen sich durch Verkehrstelematikdienste vermeiden und tragen somit zu einer Verringerung des Schadstoffausstoßes bei. Weiterhin können Hinweise auf Park and Ride-Möglichkeiten oder Anbindungen an den ÖPNV zu einer Verbesserung der Umweltsituation führen, zumal wenn der Fahrer durch aktuelle Verkehrs- und Parkplatzmeldungen über das Verkehrsgeschehen im Citybereich informiert wird. Vor allem bei Großereignissen wie Sport oder Konzertveranstaltungen, Messen, Volksfesten usw. könnte dadurch ein großer Teil des motorisierten Individualverkehrs auf öffentliche Verkehrsmittel umgeleitet werden. Neben einer Reduzierung der Luftschadstoffe bieten die genannten Telematikdienste den Vorteil, daß die Nutzer ihren Zielort schneller und entspannter erreichen.

Die Vorteile, die Verkehrstelematikanwendungen für den Umweltschutz bieten können in folgenden Punkten zusammengefaßt werden:

- Energieeinsparung durch Stauvermeidung und verstärkte Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel
- Verringerung der Abgasemissionen durch Verkürzung des Parkplatzsuchverkehrs sowie des Stop-and-Go-Verkehrs und Vermeidung von Umwegen
- Weniger Autofahrten durch zuverlässigere und damit attraktivere öffentliche Verkehrsmittel
- Verzicht auf weitere Straßenbaumaßnahmen und damit geringerer Landschaftsverbrauch

Modellrechnungen haben ergeben, daß sich durch ein verbessertes Verkehrsmanagement der Schadstoffausstoß um einen beträchtlichen Anteil verringern läßt (G. MÜLLER, 1995, S.12):

- Kohlenwasserstoffe um mehr als 40%
- Kohlenmonoxid um mehr als 20%
- Stickoxide um fast 15%
- Kohlendioxid um ca. 20%

Angeichts des steigenden Verkehrsaufkommens und der wachsenden Belastung der Umwelt durch die aus der Verbrennung von fossilen Kraftstoffen resultierenden Schadstoffen bietet die Telematik interessante Ansätze für eine umweltgerechte Verkehrsplanung. Diese soll dazu beitragen den unnötigen Verkehr zu reduzieren, den unvermeidbaren Verkehr effektiver zu gestalten und die Nutzung von umweltfreundlichen Verkehrsmitteln zu fördern.

2.2 Telematik und Wirtschaft

Arbeitsteilung und Handel haben dazu geführt, daß die Mobilität von Personen und Gütern zu einem wichtigen wirtschaftlichen Faktor geworden ist. In Deutschland werden jährlich knapp 5 Mrd. Tonnen Güter transportiert. (G. SIEGLE, 1996, S.12). Ein effizienter, schneller und kostengünstiger Transport trägt zur Sicherung eines Wirtschaftsstandortes bei.

Abbildung 6.: Personenverkehr 1996, 913,7 Mrd. Personenkilometer

Abbildung 7.: Güterverkehr 1996, 411,2 Mrd. Tonnenkilometer

Abb.6

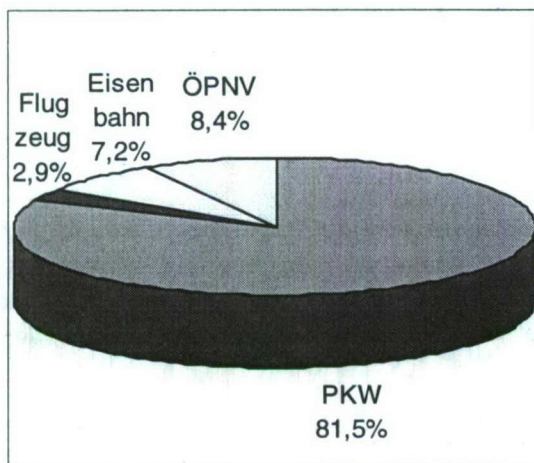
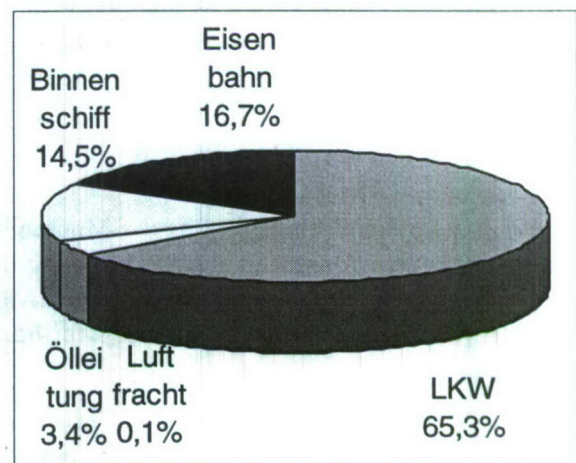


Abb.7



Quelle: Globus

Neben dem klassischen Transport von Personen und Gütern hat die Vermittlung von Nachrichten und Informationen in einer modernen Dienstleistungsgesellschaft einen wichtigen Stellenwert erlangt. Dabei wird die räumliche Mobilität immer mehr durch den Austausch von Daten mittels moderner Kommunikationstechnologien ersetzt bzw. ergänzt. Beispiele hierfür sind Videokonferenzen, Home-Banking, Teleshopping, usw. Es findet zudem eine Verlagerung des Arbeitsplatzes vom Büro oder Betrieb nach Hause zum privaten PC mit Vernetzung zum Großrechner des Arbeitgebers statt. Dies trägt zwar zur Verkehrsreduzierung bei, kann diesen jedoch nicht ersetzen, so daß ein effektives Verkehrsmanagement mit Hilfe der Verkehrstelematik zur Aufrechterhaltung und Optimierung des Personen- und Gütertransportes nötig ist, um die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten.

In Deutschland können nach Meinung von Experten durch ein verbessertes Verkehrsmanagement 40 Mrd. DM eingespart werden. (G. MÜLLER, 1995, S.12). Nach Berechnungen der Universität Köln stehen jeder in die Verkehrsleittechnik investierten Mark ein volkswirtschaftlicher Nutzen von vier DM gegenüber. (G. SIEGLE, 1996, S.85).

Die Bestrebungen zur Einführung eines europäischen Binnenmarktes sind mit intensiven Aktivitäten zur Entwicklung, Erprobung, Standardisierung und Einführung von Telematikdiensten verbunden. Ein reibungsloser und schneller Transport zwischen den europäischen Ländern trägt zur Stärkung des Wirtschaftsraumes Europa bei. Die Investitionen der EU-Länder in den Ausbau von Telematik-Einrichtungen auf den Fernstraßen belaufen sich bis zum Jahre 2000 auf 3 Mrd. ECU. An diesem

Programm war die Bundesregierung bis 1997 mit 700 Mio. DM beteiligt. Nach Einschätzungen von Experten liegen die Einsparungen, die sich durch Beseitigung der Ineffizienzen im europaweiten Straßenverkehr erzielen lassen, bei 100 Mrd. ECU. (G. MÜLLER, 1995, S.12).

Einsparungen, die durch den Einsatz von Verkehrstelematikdiensten erreicht werden können sind:

- weniger Leerfahrten durch Fracht- und Flottenmanagement
- Verringerung der Fahrzeugbestände durch bessere Auslastungsquoten
- weniger Kilometerleistung durch individuelle Zielführungssysteme
- weniger unnötige Suchfahrten für Auslieferunternehmen, Außendienstmitarbeiter, Handwerker, usw.
- Bessere Abstimmung der Verbindungen zwischen verschiedenen Verkehrsträgern (Modal Split)
- Umgehung von Staus
- Schnellere Abwicklung von Grenzformalitäten
- Steigerung der Aufnahmekapazitäten durch flexiblere Routengestaltung
- Geringere Unfallschäden und deren Folgekosten
- Geringere Lagerhaltungskosten (Just-In-Time Steuerung)

Außerdem stellt die Telematik selbst als schnell wachsender Industriezweig mit einem geschätzten, europaweiten Umsatzvolumen von 200 Mrd. DM bis zum Jahr 2010 einen nicht zu unterschätzenden Wirtschaftsfaktor mit entsprechenden positiven Einfluß auf den Arbeitsmarkt dar. (G. SIEGLE, 1996, S.14).

2.3 Telematik und Gesellschaft

Mobilität ist ein Grundbedürfnis des Menschen. Sowohl die Ausübung des Berufes, als auch die Freizeitgestaltung erfordern räumliche Mobilität. Die zunehmenden Entfernungen zwischen Wohnort und Arbeitsplatz und der Anstieg an Freizeitaktivitäten und Urlaubsreisen führen dazu, daß die Menschen immer mehr Zeit in Verkehrsmitteln verbringen. Durchschnittlich hält sich jeder Deutsche 3 Tage pro Jahr im Stau auf.

Das in den USA gestartete 10 Mrd. Dollar-Programm "Operation Time Saver" soll innerhalb von 10 Jahren die 75 bedeutendsten Ballungsgebiete, einschließlich der Interstate Highways, mit moderner Telematiktechnologie ausstatten und jedem US-Amerikaner im Durchschnitt eine Zeitersparnis von 15% im Alltagsverkehr einbringen.

Neben der Zeitersparnis bietet die Verkehrstelematik ihren Nutzern eine Erhöhung der Verkehrssicherheit. Die EU-Kommission DG XII prognostiziert eine Verringerung der Kollisionen durch Verbesserung der Reaktionszeit um 10-30% und eine bessere Versorgung der Unfallopfer durch das schnellere Eintreffen der Rettungsmannschaften von 20-30%. (G. SIEGLE, 1996, S.155).

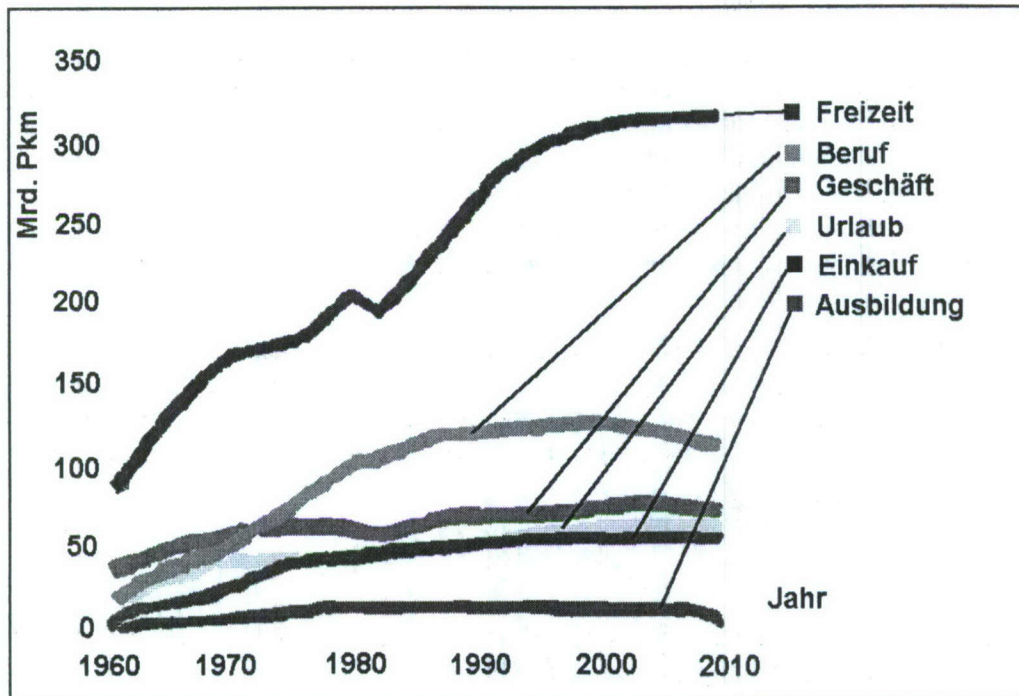
Verkehrstelematikdienste sorgen für einen besseren Ablauf des Verkehrs und unterstützen die Mobilität im Individual- und öffentlichen Verkehr z.B.:

- Niedrigere Wartezeiten beim ÖPNV durch Fahrplanauskunftssysteme
- Sicherere Anschlüsse bei Fahrten mit Bus und Bahn durch Pre-Trip-Planung
- Optimale Kombination öffentlicher und privater Verkehrsmittel
- Beschleunigung des Bus-, Straßenbahn- und Zugverkehrs durch Betriebsleitsysteme
- Verringerung der Irrfahrten in unbekannten Städten durch automatisierte Zielführungssysteme
- Weniger Parksuchverkehr durch Parkleitsysteme
- Vermeidung von Unfällen
- Schnelleres Eintreffen der Rettungsmannschaften

Die Abbildung 3 zeigt, daß das Gesamtverkehrsaufkommen sehr unterschiedliche Entwicklungen aufweist. Während die Verkehrsleistung bei Fahrten zum Ausbildungsort seit 1960 stagniert und für die Zukunft sogar ein Rückgang zu erwarten ist, ist bei Geschäfts-, Urlaubs- und Einkaufsfahrten ein leichter Anstieg zu verzeichnen. Ein stärkeres Anwachsen der Verkehrsleistung ist beim Berufsver-

kehr zu erkennen, aber auch hier wird für die nächsten Jahre ein Rückgang erwartet. Am auffälligsten ist der enorme Anstieg im Bereich des Freizeitverkehrs. Hier macht sich die gesellschaftliche Entwicklung zur Freizeitgesellschaft bemerkbar. Der Anteil der Freizeit steigt und wird immer aktiver genutzt, was einen Anstieg der Mobilität zur Folge hat. Dieser Trend muß auch in der Verkehrstelematik berücksichtigt werden. Möglichkeiten sind die Vermittlung von freizeitspezifischen Verkehrsinformationen wie z.B. intensive Verkehrsdatenerhebung an Zufahrtsstrecken zu beliebten Ausflugs- und Freizeitzielen um frühzeitig Stauwarnungen und Umleitungsempfehlungen auszustrahlen, gezieltes Parkraummanagement an Sportstadien, Badeseen, Skigebieten, usw..

Abbildung 8.: Entwicklung der Verkehrsleistung nach Fahrtzwecken



Quelle: VDA

3 Technologien, Systeme und Anwendungen

Basierend auf den Basistechnologien der Telekommunikation werden unterschiedliche Informationsinhalte an die Verkehrsteilnehmer übermittelt. Neben dem Datenaustausch muß dem Fahrer auch eine Ortungs- und Navigationsmöglichkeit zur Verfügung stehen um die Informationen in ihrem räumlichen Kontext auswählen und beurteilen zu können. Diese Zusammenhänge und die daraus resultierenden Anwendungen werden im folgenden erläutert.

3.1 Basistechnologien

Zunächst sollen die technischen Voraussetzungen der einzelnen Telematikanwendungen vorgestellt werden.

3.1.1 Telekommunikation

Im folgenden wird ein kurzer Überblick über einige Telekommunikationssysteme gegeben. Da im Rahmen dieses Artikels nicht alle Systeme berücksichtigt werden können, werden die wichtigsten Telekommunikationstechnologien herausgegriffen und ihre wesentlichen Merkmale herausgearbeitet.

3.1.1.1 RDS-TMC und DAB

Der Austausch von Informationen zwischen Fahrzeugen und Verkehrsleitzentralen erfolgt mit Hilfe unterschiedlicher Telekommunikationsmittel. Dabei unterscheidet man zwischen einer mono- und einer bi-direktionalen Datenkommunikation. Während erstere lediglich Informationen an den Fahrer weitergibt, erlaubt die bi-direktionale Kommunikation auch einen Informationstransfer vom Fahrzeug zur Leitstelle. Beispiele für mono-direktionale Telekommunikation sind der **Radio Data System-Traffic Message Channel RDS-TMC** und der digitale Hörfunk **DAB (Digital Audio Broadcast)**. Mit Hilfe der Mobilfunknetze wird ein bi-direktionaler Datenaustausch ermöglicht und es können somit Informationen zur Verkehrslage, Straßenzustand, Witterungsverhältnisse, Notfallmeldungen, usw. weitergegeben werden.

RDS-TMC geht einen Schritt weiter als der traditionelle Verkehrsfunk. Mit dem analogen Radiosignal werden aktuelle Verkehrsinformationen in digitaler Form ausgesendet. Diese stehen dem Fahrer jederzeit zur Verfügung und können auch im Ausland in der jeweiligen Muttersprache empfangen werden. Die Informationen werden automatisch erfaßt und sind hochaktuell. Die Ausgabe kann auf bestimmte Strecken begrenzt und automatisch gespeichert werden. Für RDS-TMC lassen sich nach ersten Abschätzungen in Abhängigkeit vom Ausrüstungsgrad Potentiale für Verkürzungen der Fahrzeiten um bis zu 19% und für die Verminderung von CO-Emissionen bis zu 7% ermitteln. (G. SIEGLE, 1996, S.203).

Der digitale Hörfunk DAB kann die RDS-TM Verkehrsinformationen übernehmen und bietet den Vorteil einer höheren Datenübertragungsrate. Der Aufbau von Sendern, die Nutzung von Frequenzen und andere Fragen sind noch ungeklärt. Nach Einschätzung von ERTICO sollte sich die Forschung auf die weitere Entwicklung des digitalen Hörfunks konzentrieren. (Informationsunterlagen zum 4. Weltkongreß für Verkehrstelematik, 1997).

3.1.1.2 GSM

Während die oben geschilderten Verfahren lediglich die Fahrzeuge mit aktuellen Verkehrsinformationen versorgen, können durch Kommunikation durch Mobilfunknetze Daten in beide Richtungen übertragen werden.

Das "Global System for Mobile Communications" **GSM** bietet als erster internationaler digitaler Mobilfunkstandard ein geeignetes Mittel des Informationsaustausches. Weltweit haben sich fast 100 Signataire aus 66 Ländern verpflichtet GSM einzuführen. Für einen grenzüberschreitenden Datenaustausch zwischen Fahrzeug und Verkehrsleitstelle werden keine weiteren Infrastruktureinrichtungen benötigt und eine offene Systemarchitektur mit transparenten Schnittstellen bietet verschiedenen Nutzern die Möglichkeiten der Einbindung in spezielle Anwendungen. (G. MÜLLER, 1995, S. 196).

Der Einsatz von GSM in der Verkehrstelematik erfordert folgende Voraussetzungen (G. SIEGLE, 1996, S. 185):

- eine einfache und flexible Adressierung
- Rundrufe für alle Teilnehmer
- Kommunikation innerhalb einer Teilnehmergruppe
- schneller Rückrufaufbau (Notfallmeldungen)
- effektiver Datenübertragungsdienst für extrem viele, kurze Datenübertragungen, die aus nicht immer vorhersehbaren, eng begrenzten Gebieten praktisch gleichzeitig angefordert werden

3.1.1.3 Iridium

Iridium ist ein satellitengestütztes globales Kommunikationssystem, das unter der Leitung des Motorola-Konzerns 1998 den Betrieb aufnehmen wird. Das Raumsegment besteht aus 68 Satelliten (plus 6 Ersatzsatelliten im Orbit) in einer Höhe von 780 km. Dabei befinden sich jeweils 11 operationelle und 1 Ersatzsatellit auf einer der 6 polaren Umlaufbahnen. Die niedrigen Umlaufbahnen erlauben (im

Vergleich zu geostationären Kommunikationssatelliten in einer Höhe von ca. 36 000 km) eine bessere Datenübertragung. Die kleinen und leichten (689 kg) Satelliten stehen miteinander in Kommunikation (Inter-Satelliten Link) und erlauben eine weltweite Abdeckung. Die Verbindung zwischen den Satelliten (23.18 - 23.38 GHz.) und von den Satelliten zur Bodenstation (Downlink 19.4 - 19.6 GHz. und Uplink 29.1 - 29.3 GHz.) findet im Ka-Band statt, die Telefon- und Kommunikationsverbindungen im L-Band (1616 - 1626.5 MHz.). Derzeit sind 44 Satelliten im All. Das Raumsegment des Systems soll bis September 1998 installiert werden.

In Gebieten mit einem kompatiblen Mobilfunknetz kann diese Infrastruktur in das System integriert werden. Die Dienstleistungen werden in den einzelnen Ländern durch Telekommunikationsbehörden und Service-Provider angeboten. Der deutsche Betreiber Iridium Services Deutschland GmbH hat ein Vertriebsgebiet über 21 europäische Staaten und Israel. Dieser Raum wird von einer Bodenstation bei Rom versorgt, die von o.tel.o communications betrieben wird und ebenfalls von Iridium Italia genutzt wird.

Durch seine globale Verfügbarkeit und hohe Qualität der Datenübertragung bietet Iridium nach Beginn des Betriebes 1998 ein geeignetes Mittel zur Übertragung von Verkehrsinformationen im Bereich der Verkehrstelematik.

3.1.1.4 Globalstar

Der Globalstar Konzern wurde 1991 von Qualcomm und Space Systems/Loral mit dem Ziel ein globales, satellitengestütztes Kommunikationssystem zu errichten gegründet.

Das Raumsegment von Globalstar wird aus 48 LEO (Low Earth Orbit) Satelliten plus 8 Ersatzsatelliten im Orbit gebildet. Die 450 kg. schweren Satelliten haben eine Lebensdauer von 7,5 Jahren und werden im August 1998 den Betrieb aufnehmen und ab 1. Januar 1999 ihre volle Einsatzfähigkeit erreichen. Der Start der ersten vier Globalstarsatelliten wird im Februar 1998 stattfinden. Wie Iridium wird Globalstar eine weltweite Übertragung von Telefongesprächen, Fax und Daten anbieten und kann ebenfalls existierende landgestützte Mobilfunknetze in den Betrieb einbinden.

Bei Abschattung eines Satelliten durch Gebäude oder Geländeerhebungen wird das Signal auf einen anderen Satelliten umgelenkt und damit die Gefahr einer Unterbrechung der Kommunikation vermindert.

3.1.1.5 Teledesic

Das von dem ehemaligen McCaw Cellular Communications Gründer und Bill Gates initiierte Telekommunikationssystem Teledesic soll im Jahr 2002 seinen weltweiten Betrieb aufnehmen. Mit ca. 280 Satelliten soll Teledesic über das weitaus aufwendigste Raumsegment verfügen. Die geostationären LEOS werden in einer Höhe von 435 Meilen für die Übermittlung der Daten sorgen. Dabei werden beim Uplink Datenmengen zwischen 16 Kilobits und 2 Megabits pro Sekunde, beim Downlink bis zu 28 Megabits pro Sekunde bewältigt werden. Jederzeit sollen gleichzeitig 20 000 T1-Verbindungen (1 544 Mbps) möglich sein.

Laut Prognosen wird mit dem größten Umsatz für Teledesic im asiatischen Raum gerechnet, während der U.S.-amerikanische Anteil auf ca. einem Drittel des Gesamtumsatzes geschätzt wird.

3.1.2 Informationsinhalte

Welche Informationen sollen nun an den Verkehrsteilnehmer mit Hilfe der unterschiedlichen Telekommunikationsmittel weitergegeben werden? Für den Transport von Personen oder Gütern ist der Start- und Zielpunkt bekannt. Zeitraum und Beginn der Reise bzw. des Transportes richten sich nach der Wahl des entsprechenden Verkehrsmittels, so daß bereits für die Wahl der optimalen Verbindung eine Reihe von Informationen benötigt wird. Auch während der Fahrt müssen je nach Art des Verkehrs verschiedene Informationen ausgetauscht werden. Beispielhaft kann hier genannt werden:

- Art der in Frage kommenden Verkehrsmittel
- Routenauswahl
- Abfahrts/flugzeiten, Anschlüsse und Wartezeiten
- Fahr/Flugpreise
- Reservierungen
- Verspätungen
- Notrufinformationen
- Parkmöglichkeiten an Bahnhöfen und Flughäfen
- Übernachtungsmöglichkeiten

Privater Kfz-Verkehr:

- Routenauswahl
- Aktuelle Information zur Verkehrslage
- Notrufinformationen
- Warnung bei Schnee, Nebel, Glatteis, Nässe
- Parkmöglichkeiten
- Straßengebühren
- Tankstellen
- Werkstätten
- Übernachtungsmöglichkeiten
- Restaurants

Gütertransport:

- Art der in Frage kommenden Verkehrsmittel
- Abfahrtszeiten, Anschlüsse und Wartezeiten
- Kosten: Fahrpreise, anfallende Straßengebühren, Benzinverbrauch
- Routenauswahl
- Aktuelle Information zur Verkehrslage
- Notrufinformationen
- Auslastung von Transportfahrzeugen
- Art der Ladung
- Warnung bei Schnee, Nebel, Glatteis, Nässe
- Wartezeiten an Grenzen
- Tankstellen
- Werkstätten
- Restaurants

Die genannten Informationen werden aus verschiedenen Quellen erfaßt, in einer Leitzentrale gesammelt und ausgewertet und durch Mittel der Telekommunikation an den Bordrechner des Nutzers weitergeleitet. Dort werden die Informationen aufbereitet ("mobile Intelligenz") und über eine graphische Darstellung oder Sprachausgabe an den Fahrer weitergegeben. Diese Schnittstelle wird als **MMI** (Man Maschine Interface) bezeichnet. Bei der Datenausgabe ist darauf zu achten, daß dies in einer Form geschieht, die den Fahrer nicht vom Straßenverkehr ablenkt und gefährdet. Deswegen sollten einfache und übersichtliche Graphiken verwendet werden, die den Fahrer über den unmittelbar bevorstehenden Streckenabschnitt informieren. Übersichtsdarstellungen, Routenauswahlmöglichkeiten und komplexere Sachverhalte sollten nur bei geparktem Fahrzeug ausgegeben werden.

3.1.3 Ortung/Navigation

Für alle Anwendungen der Verkehrstelematik ist es wichtig die Position der einzelnen Verkehrsträger zu bestimmen und den Verkehrsteilnehmern die Navigation von einem Startpunkt zum Zielpunkt zu ermöglichen. Das deutlichste Beispiel für die Bedeutung von Navigationsverfahren in der Verkehr-

stelematik sind die individuellen Zielführungssysteme, die es dem Fahrer ermöglichen mit Hilfe des im Fahrzeug installierten Navigationsequipments, einer digitalen Straßenkarte und eines im Fahrzeug angebrachten Rechners (**On-Board-Unit**) oder einer zentralen Leitstelle ein bestimmtes Fahrziel anzusteuern. Dabei werden dem Fahrer die benötigten Informationen durch das MMI in Form einer kartographischen Darstellung, Richtungspfeilen oder einer Sprachausgabe vermittelt.

Im folgenden sollen die wichtigsten Navigationsverfahren, die im Bereich der Telematik zum Einsatz kommen, vorgestellt werden.



Abbildung 9.:

Beispiel eines MMI mit kartographischer Darstellung

3.1.3.1 Funknavigation

Seit sieben Jahrzehnten sind Verfahren der Funknavigation im Einsatz. Das Prinzip dieser Methode besteht in der Ortsbestimmung aus den Laufzeiten und dem Laufverhalten von Funksignalen, die von ortsfesten oder bekannten Positionen ausgesandt werden. Einige Beispiele sind Loran C, Chayka, Decca, VOR (VHF Omnidirectional Radio Range), DME (Distance Measuring Equipment), etc.. In der Telematik werden derzeit vor allem Verfahren der Satellitennavigation verwendet. Dies sind momentan das vom U.S. Department of Defense betriebene **Global Positioning System (GPS)** und das **Global Navigation Satellite System (GLONASS)** der russischen Konföderation. Beide Systeme bestehen aus Raum-, Boden- und Nutzersegment.

- **Raumsegment:** Das Raumsegment besteht bei beiden Systemen aus je 24 Satelliten, wobei diese sich bei GPS auf 6 Umlaufbahnen und bei GLONASS auf 3 Umlaufbahnen befinden. Während alle GPS-Satelliten auf den gleichen 2 Frequenzen (L1, L2) senden und sich durch ihren aufmodulierten Code unterscheiden, verfügen die GLONASS-Satelliten über den jeweils gleichen Code und unterscheiden sich in ihren Frequenzen.

Die Höhe der inklinierten (55°) Umlaufbahn beträgt bei GPS 20 200 km bei einer Umlaufzeit von 11h 58min. Die Bahn der GLONASS-Satelliten verläuft in einer Höhe von 19 200 km, bei einer Inklination von $64,8^\circ$ (daraus ergibt sich für GLONASS in höheren geographischen Breiten eine bessere Verfügbarkeit als GPS) und einer Umlaufzeit von 11h45min.

Während GPS seit 1993 mit seiner vollen Satellitenbestückung in Betrieb ist, wird GLONASS (seit 1996 in Betrieb) derzeit mit geringerer Satellitenanzahl betrieben.

- **Bodensegment:** Das Bodensegment besteht bei beiden Systemen aus einer Reihe von Kontrollstationen, von denen die Satellitenbahnen überwacht und korrigiert werden. Die Bahndaten der Satelliten werden als **Ephemeriden** (Umlaufparameter eines Satelliten) und **Almanach**-Daten (Bezug aller Satellitenbahnen zueinander) ausgestrahlt. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Systemen besteht darin, dass die GPS-Daten für zivile Nutzer künstlich verschlechtert werden (**Selective Availability, SA**), dies ist bei den GLONASS-Signalen nicht der Fall.
- **Nutzersegment:** Unter dem Nutzersegment versteht man die verschiedenen Typen von Receivern (das Angebot reicht von preisgünstigen Handgeräten bis zu komplexen Geräten für höchste Genauigkeit, die für sicherheitskritische Spezialanwendungen benötigt werden) und die Gemeinschaft aller Nutzer. Die Positionsdaten werden in geographischen Koordinaten ausgegeben, wobei GPS das World Geodetic System 1984 (**WGS 84**) und GLONASS das **SGS-90** Bezugssystem verwenden. Für die Bestimmung einer 2-dimensionalen Position werden 3, für eine 3-dimensionale Position werden 4 Satelliten benötigt, wobei jeweils auch noch die genaue Uhrzeit mitbestimmt wird.

Bei der Navigation im Telematikbereich kommt vor allem GPS zum Einsatz. Während für autorisierte, in der Regel militärische, Benutzer der Precise Positioning Service (**PPS**) mit einer Genauigkeit von 22m (horizontal), 27m (vertikal) und 100ns für Zeitmessungen verfügbar ist, kann von zivilen Nutzern lediglich der Standard Positioning Service (**SPS**) mit einer Genauigkeit von 100 (horizontal), 156m (vertikal) und 340ns (Zeitmessung) empfangen werden.

Diese Ergebnisse können durch Verwendung eines differentiellen Korrekturverfahrens verbessert werden. Man spricht dann von **DGPS** bzw. **DGLONASS**. Dabei werden an exakt vermessenen Standpunkten Referenzstationen positioniert und der auftretende Fehler zwischen der tatsächlichen Position und der mit Hilfe der Satellitennavigation ermittelten Position berechnet. Angesichts der großen Entfernung zu den Satelliten gilt für die, in der Umgebung der Referenzstation eingesetzten, mobilen Empfänger der gleiche Positionierungsfehler. Die Korrekturdaten werden über UKW, Mobilfunk (GSM) oder eigene Sendeeinrichtungen an die Empfänger übertragen und die Meßgenauigkeit bis in den Meterbereich verbessert. Mit Empfängertypen, die eine Auswertung der Trägerphasen ermöglichen, kann eine Steigerung der Genauigkeit in den Zentimeterbereich erreicht werden.

3.1.3.2 Koppelnavigation

Neben den beschriebenen Verfahren der Funknavigation kommen in der Verkehrstelematik noch andere Navigationsmittel wie z.B. Kompaß, Drehratensensoren, Radsensoren und Geschwindigkeitsmesser zum Einsatz. Sie dienen der Ermittlung eines Vektors mit Richtungs- und Geschwindigkeitsangaben. Mit Hilfe dieses Vektors kann, ausgehend von einer bekannten absoluten Position (z.B. durch GPS-Messung) und der verstrichenen Zeit die aktuelle Position errechnet werden (Koppelnavigation). Die durch Koppelnavigation bestimmte Position sollte in regelmäßigen Intervallen durch ein Verfahren der absoluten Ortsbestimmung abgeglichen werden, da sonst auftretende Fehler mitgeführt werden und erhebliche Positionsfehler auftreten können. Speziell für Radsensoren ist zu beachten, daß nasse oder unebene Fahrbahnen und Geländeerhebungen zu einer Verfälschung der Positionsbestimmung führen können.

3.1.3.3 Digitale Karte

Die digitale Karte, die bei der Navigation im Bereich der Verkehrstelematik als Grundlage dient, enthält neben der Geometrie und Attributierung des Straßennetzes zusätzliche Informationen wie z.B. Abbiegebeschränkungen, Durchfahrtsperren, Einbahnstraßen, usw.. Erzeugt wird diese vektorielle Straßenkarte durch Digitalisieren analoger Kartenwerke oder On-Screen-Digitizing gescannter Karten oder Luftbilder. Diese Rasterinformationen können auch als Zusatzinformationen im Bildschirmhintergrund beibehalten werden und erleichtern vor allem bei der Darstellung von Übersichten in kleinen Maßstäben die Orientierung. Durch Streckenbefahrungen werden Straßenattribute erfaßt und verifiziert.

Die digitale Karte selbst dient ebenfalls der Navigation. Durch **Map-matching** wird die, aus Informationen der Navigationssensoren (Richtungswinkel, Strecke) berechnete Position mit der digitalen Karte abgeglichen und aktualisiert. Damit lassen sich hohe Genauigkeiten in der Ortsbestimmung erreichen ($< 10\text{m}$).

3.1.3.4 Baken, Balisen

An der Straße positionierte Baken und Balisen dienen ebenfalls der Navigation. Beim Passieren einer Bake wird dem Bordrechner über ein Infrarot- oder Mikrowellensignal der aktuelle Standpunkt mitgeteilt. Gleichzeitig können auch Informationen vom Fahrzeug ausgesandt und zu einer Verkehrszentrale weitergeleitet werden. Man spricht hier auch von **short range communication**.

Beispiele für den Einsatz der Baken-Technologie sind die Programme Euroscout und STORM. Bei Euroscout sind die Baken mit der Zentrale verbunden und werden von dort aus verwaltet, so daß die verkehrsrelevanten Informationen leicht aktualisiert werden können. Mit einer Übertragungsrate von 500 kBits/s werden die Daten an die Fahrzeuge übertragen und die Fahrer über Streckensperrungen, Umleitungen usw. informiert. In Stuttgart wurden im Rahmen des Projektes STORM die Baken mit RDS/TMC kombiniert. Sobald vom Fahrzeug die vorhandene Baken-Infrastruktur erkannt wird, schaltet der Bordrechner auf Bakenkommunikation um und führt eine neue Positionierung und Karten-Update aus.

Weitere Einsatzgebiete der Kommunikation durch Baken sind Busleitsysteme, ÖPNV Ampelvorrangschaltungen und die Übermittlung lokaler Warnmeldungen.

3.2 Anwendungen

Im folgenden sollen einige typische Anwendungsbeispiele für Verkehrstelematikanwendungen vorgestellt und erläutert werden

3.2.1 Routenführung

Die Routenführung bietet dem Fahrer aufgrund der digitalen Straßenkarte und einer Gewichtung der Straßen eine optimale Route an. Sollte sich während der Fahrt die vorgeschlagene Route als nicht befahrbar herausstellen (Unfall, Stau usw.) wird vom System eine alternative Routenführung berechnet und der Fahrer über die Änderung informiert.

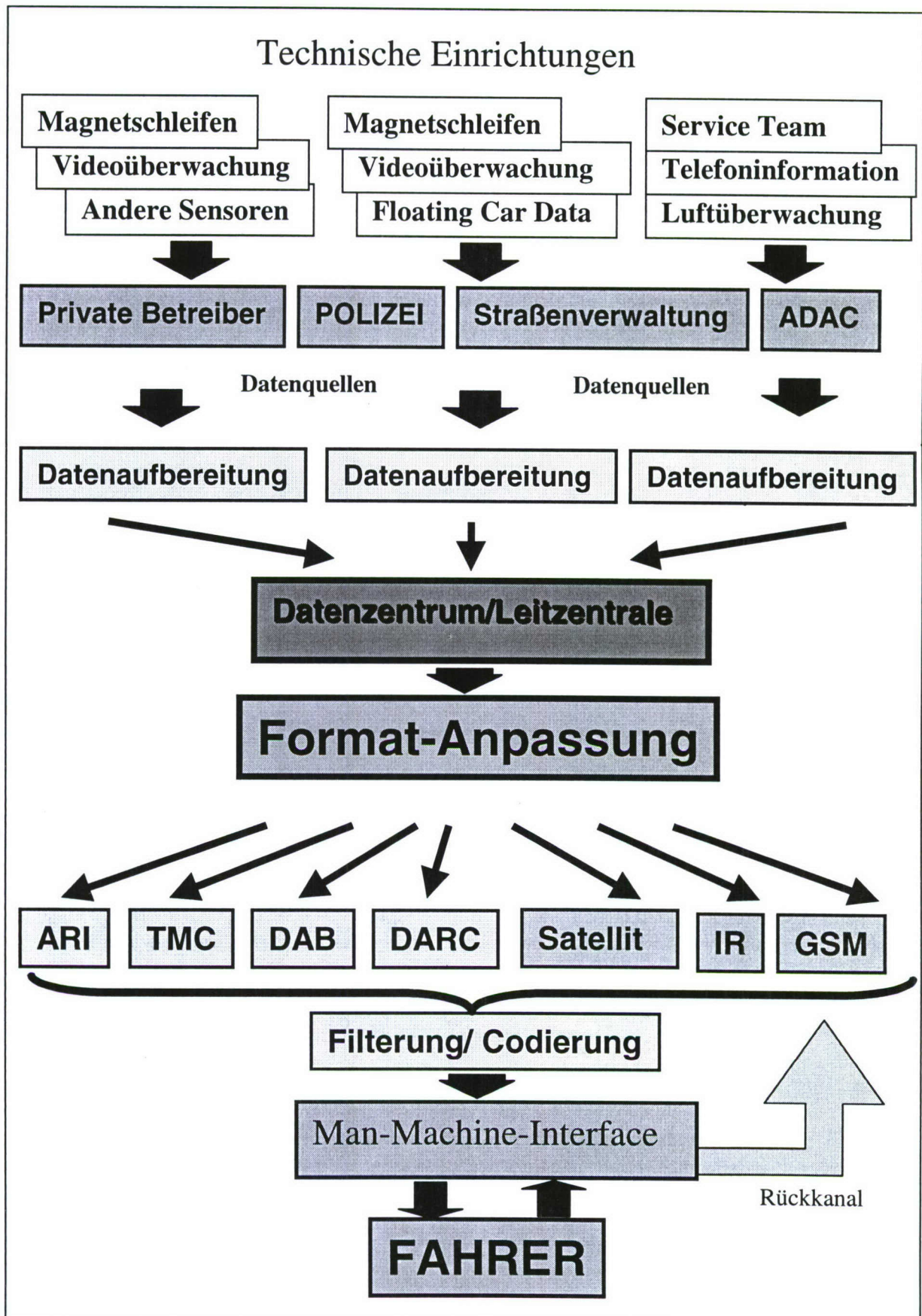
Die Übermittlung der Fahrinformationen an den Fahrer findet durch ein Display mit einer kartographischen Darstellung oder durch Richtungspfeile statt. Einige Systeme bieten auch eine Sprachausgabe an. Dies ist sicherlich ein Vorteil, da der Fahrer während der Fahrt nicht vom Verkehrsgeschehen abgelenkt wird und somit die Einhaltung der Verkehrssicherheit gewährleistet wird. Für ortsfremde Verkehrsteilnehmer ohne Beifahrer entfällt die Orientierung durch den Stadtplan während der Fahrt und trägt somit ebenfalls zur Erhöhung der Verkehrssicherheit bei.

Eine wesentliche Verbesserung stellt sicher die Einbindung aktueller Verkehrslageinformationen in die Routenführungssysteme dar. Der Fahrer kann frühzeitig über eventuelle Staus informiert werden und auch Ortsunkundige können ohne größere Zeitverluste den Stau umfahren. Ein schlüssiges Konzept zur Umsetzung dieser Anwendung liegt jedoch noch nicht vor. Ein Grund hierfür ist, daß dafür zuverlässige und aktuelle Verkehrsdaten vorliegen müssen, die bisher nur eingeschränkt verfügbar sind.

3.2.2 Verkehrsdatenerfassung

Die Verkehrsdatenerfassung wird neben den bereits angesprochenen Baken auch durch Verkehrszählungen, Hochrechnungen und Prognosen, Induktionsschleifen, Videokameras oder Hubschraubereinsatz durchgeführt.

Abbildung 10.: Dynamische Verkehrsdatenüberwachung



Eine dynamische Methode der Verkehrsdatenerfassung ist das Floating-Car-Data Prinzip (FCD). Dabei werden von den im Verkehr befindlichen Fahrzeugen Daten wie z.B. Position und Geschwindigkeit empfangen, daraus verkehrsrelevante Informationen, wie z.B. Stauwarnungen, abgeleitet, deren Integrität durch Plausibilitätschecks geprüft und Informationen an einen Zentralrechner zurückgesandt. Die einzelnen Fahrzeuge bleiben aus Datenschutzgründen anonym.

Abbildung 10 verdeutlicht welche Daten, Institutionen, Technologien und Informationsflüsse im Rahmen der dynamischen Verkehrsdatenerfassung zum Einsatz kommen.

3.2.3 Notfallruf

Im Falle eines Notfalls kann vom Fahrer ein Signal zu einer Rettungsdienststelle abgesetzt werden. Dies kann auch automatisch geschehen, indem z.B. beim Auslösen des Air-bags der Notfallruf aktiviert wird. Meldet sich der Fahrer innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls nicht bei der zuständigen Zentrale und reagiert nicht auf Anrufe, kann über die bekannte Fahrzeugposition eine Rettungsmannschaft zur Unfallstelle geschickt werden.

3.2.4 Diebstahlschutz/-verfolgung

Bei Diebstahl kann der aktuelle Aufenthaltsort des entwendeten Fahrzeugs ermittelt und die zuständigen Behörden informiert werden. Ein Hinweis in Form eines Aufklebers, daß ein Fahrzeug über einen satellitengestützten Diebstahlschutz verfügt, kann unter Umständen schon einen Diebstahl verhindern. Vor allem bei der Überführung teurer Fahrzeuge in diebstahlgefährdete Gebiete kann diese Anwendung z.B. ein geeignetes Mittel zur Schadensbegrenzung darstellen.

3.2.5 Flottenmanagement

Für Betreiber von größeren Fahrzeugflotten wie z.B. Speditionen, Taxiunternehmen, Polizei, Feuerwehr usw. kann der Einsatz eines Flottenmanagementsystems zu Zeit- und damit Kosteneinsparungen beitragen. Eine flexiblere Routengestaltung wird ermöglicht, unnötige Leerfahrten und Wartezeiten werden vermieden, die Transportkapazität damit erhöht und Umwege durch ortsunkundige Fahrer vermieden.

3.2.6 Road Pricing

Die Kombination der modernen Navigations- und Kommunikationstechnologien ermöglichen eine flexible Straßengebührenerhebung ohne die Einrichtung spezieller Infrastruktureinrichtungen wie Mautstellen und Schranken. Wartezeiten werden vermieden und der Fahrer bezahlt nur für die tatsächlich zurückgelegte Strecke. Die Einführung der "elektronischen Maut" wird derzeit für den LKW Verkehr diskutiert.

4 Nutzen und Wirtschaftlichkeit

Der Nutzen der unter Punkt 3 genannten Verkehrstelematikanwendungen wurde für die einzelnen Anwendungen dargestellt. Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß mit Hilfe der angebotenen Geräte, Servicezentralen und Dienstleistungen der vorhandene Verkehr optimiert, das vorhandene Straßennetz besser ausgelastet, die Verkehrssicherheit erhöht und eine ökologischere Gestaltung des Verkehrs ermöglicht wird. Sowohl der einzelne "Privatfahrer" als auch gewerbliche Nutzer profitieren von den neuen Anwendung, die durch die Entwicklungen in der Telematik ermöglicht werden.

Neben den Aspekten des Umweltschutzes und der Verkehrssicherheit kann die Verkehrstelematik auch einen erheblichen Nutzen in wirtschaftlicher Hinsicht leisten, wie die in Punkt 2.2 genannten Zahlen belegen. Auf welche Summen sich der, durch Telematikdienste zu erzielende wirtschaftliche

Nutzen beläuft, ist schwer abzuschätzen, da eine Vielzahl komplexer Parameter wie z.B. Zeitersparnis, geringerer Benzinverbrauch, geringere Unfallfolgekosten, usw. in diese Berechnungen eingehen müßten. In welchen Maße Telematikanwendungen in einem konkreten Beispiel direkt einen wirtschaftlichen Vorteil bieten, muß daher für jeden Fall einzeln betrachtet werden. Einige Applikationen dienen in erster Linie der Sicherheit und Bequemlichkeit des Fahrers, wobei der wirtschaftliche Nutzen nicht im Vordergrund steht, andere Anwendungen wie z.B. das Flottenmanagement bieten ihren Anwendern in erster Linie die Möglichkeit Aufgaben effektiver auszuführen und somit einen wirtschaftlichen Nutzen aus den Verkehrstelematikanwendungen zu ziehen. Auf die potentiellen Einsparungen in Höhe von 40 Mrd. DM (BRD) wurde bereits in Punkt 2.2 verwiesen, ebenso auf das Verhältnis Investitionen im Bereich Verkehrstelematik/volkswirtschaftlicher Nutzen von $\frac{1}{4}$ (G. SIEGLE, 1996, S.85).

5 Perspektiven

Die aufgezeigten Entwicklungen im Bereich der Basistechnologien wie z.B. Iridium, Globalstar und Teledesic als zukünftige Telekommunikationssysteme und EGNOS, ENSS und GNSS-2 als Ortungs- und Navigationssysteme werden sicherlich die Verkehrstelematik erheblich beeinflussen.

Durch die Fortschritte in der Kommunikationstechnologie werden zukünftig größere Datenmengen noch schneller übermittelt werden und dabei weltweit zur Verfügung stehen. Der Ausbau von Referenzstationen zur Steigerung der Genauigkeit von Satellitennavigationssystemen und die Überlegungen zur Einführung eines zivilen, satellitengestützten Navigationssystems bieten erfolgversprechende Lösungsansätze um bestehende Mängel zu beseitigen und eine solide Basis für zukünftige Verkehrstelematikanwendungen zu schaffen.

Der Ausbau bestehender Verkehrserfassungssysteme und die Entwicklung neuer Methoden der Datengewinnung werden es den Verkehrsleitzentralen ermöglichen aktuellere und zuverlässigere Informationen an die Fahrer weiterzugeben als dies heute möglich ist und den Verkehrsfluß weiter zu optimieren. Die heute bereits üblichen Verkehrstelematikanwendungen wie z.B. individuelle Zielführung werden durch die Integration von qualitativ hochwertigen Verkehrsdaten verbessert und über neue Anwendungen wie z.B. die automatische Steuerung von Fahrzeugkolonnen wird bereits nachgedacht.

6 Zusammenfassung

Die Verkehrstelematik, eine junge Disziplin, die hauptsächlich auf satellitengestützten Ortungs- und Navigationssystemen in Verbindung mit modernen Telekommunikationstechnologien basiert, hat in den letzten Jahren gezeigt, daß eine Alternative zu einem weiteren Ausbau des Straßennetzes besteht. Mit Hilfe der unterschiedlichen Anwendungen ist es möglich das steigende Verkehrsaufkommen zu koordinieren und umweltschonender zu gestalten. Eine Vielzahl von Endgerätenherstellern, Dienstleistungszentralen und Telematiknutzern demonstrieren durch tägliche Praxis welchen Beitrag die Verkehrstelematik zur Aufrechterhaltung der Mobilität leisten kann. Neben einer Verbesserung der Verkehrssicherheit und Bequemlichkeit entsteht auch ein erheblicher wirtschaftlicher Nutzen. Durch die fortschreitende Entwicklung im Bereich der Ortungs- und Navigationstechnologie und der neuen Kommunikationsmittel eröffnen sich neue, vielversprechende Anwendungsbereiche, die zur Bewältigung der anstehenden Probleme im Verkehrssektor beitragen können.

7 Literaturverzeichnis

DGON: *Tagungsband zum Seminar SATNAV 97*

Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation e. V., Bonn, 1998.

GASSNER R., KEILINGHAUS A., NOLTE R.: *Telematik und Verkehr, Elektronische Wege aus dem Stau.*

Beltz Zukunftsstudien, Weinheim und Basel, 1994.

LECHNER W., BAUMANN S.: *Grundlagen der Verkehrstelematik, Kompendium der Verkehrstelematik.*

TÜV Rheinland, Köln, 1998.

MÜLLER G., HOHLWEG G.: *Telematik im Straßenverkehr.*

Springer-Verlag, Heidelberg, 1995.

SIEGLE G: *Telematik im Verkehr.*

R.v.Decker's Verlag, Heidelberg, 1996.

ZÄNGL W.: *Der Telematik-Trick.*

Raben-Verlag, München, 1995.

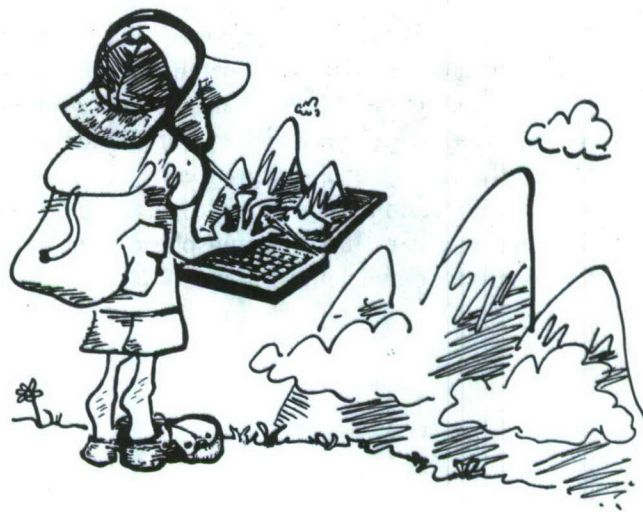
Informationsmaterial:

- Blaupunkt
- Bundesministerium für Verkehr
- Mannesmann Autocom
- Opel
- Philips Car Systems
- Tegarom
- Teleatlas

DATENBASIS FÜR DIE ENTWICKLUNG EINES MULTIMEDIALEN SOFTWAREPRODUKTES ZUR PLANUNG VON FREIZEITAKTIVITÄTEN IN DEN ALPEN

Diplom-Geographin Monika Mösbauer

Institut für Geodäsie
Universität der Bundeswehr München
85577 Neubiberg



Zusammenfassung

Im Rahmen des Förderprogrammes der EU „INFO2000“ (Entwicklung marktfähiger multimedialer Softwareprodukte auf der Grundlage digitaler Datenbestände) wird die Realisierung eines multimedialen Alpen-Tourenführers unterstützt. An der Entwicklung sind neben den Firmen Huber Kartographie (München), mapgraphic edition (Italien) und Sparrer Kartographie (München) auch die Arbeitsgemeinschaft GIS der Universität der Bundeswehr (München) beteiligt.

Der internetfähige multimediale Alpen-Tourenführer unterstützt den Bergfreund bei der Vorbereitung und Planung von Freizeitaktivitäten im Alpenraum. Um das Potential bereits vorhandener Datenbestände zu nutzen, werden digitale amtliche Basisdaten der beteiligten Landesvermessungsämter als Grunddatenbestand verwendet. Interessante Objekte zu einer Tour sind in Form von Text, Foto oder Videoaufnahme verfügbar. Da das Softwareprodukt mit internetfähiger Technologie entwickelt wurde, besteht für Nutzer mit Internetanschluß langfristig die Möglichkeit, über Hyperlinks direkt auf Internet-Dienste zuzugreifen, die aktuelle Zusatzinformationen anbieten. Vorliegender Artikel beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit Aufbau, Aufbereitung und Integration der Datenbasis für das Projekt.

1 Einführung

In allen europäischen Ländern wird seit geraumer Zeit mit hohem Finanzaufwand die Erfassung von Grunddatenbeständen in digitaler Form betrieben. Leider werden diese Datenbestände fast nicht kommerziell genutzt. Dies ist einer der Gründe, warum die Europäische Gemeinschaft mit dem Programm INFO2000 auf Kostenteilungsbasis Projekte zur Anregung der Entwicklung einer europäischen Industrie für Multimedia-Inhalte unterstützt.

Ein Ziel des Programmes INFO2000 (Entwicklung marktfähiger multimedialer Softwareprodukte auf der Grundlage digitaler Datenbestände) ist u.a. die Demonstration der europaweiten oder grenzüberschreitenden Integration bzw. Verknüpfung von Grunddatenbeständen, die Bestandteile künftiger kommerzieller Anwendungen werden können.

Aufgrund dieser Voraussetzung reifte die Idee, einen multimedialen internetfähigen Alpenführer zu entwickeln, unter Einbeziehung von grenzüberschreitenden Grunddatenbeständen der betreffenden Landesvermessungsämter. An der Entwicklung sind neben den Firmen Huber Kartographie (München), mapgraphic edition (Italien) und Sparrer Kartographie (München) auch die Arbeitsgemeinschaft GIS¹ der Universität der Bundeswehr (München) beteiligt. Von Januar 1997 bis Juni 1997 wurde eine Definitionsphase von der EU gefördert. Während dieses Zeitraumes wurde einerseits als Pilotprodukt eine Software entwickelt, die die wesentlichen Funktionen bereits beinhaltet, andererseits wurden Methoden der Datenaufbereitung und -integration geprüft und eine Machbarkeitsstudie erstellt. Dieser Prototyp wurde durch die Kommission der Europäischen Gemeinschaft zur Weiterförderung ausgewählt und somit kann in einer Durchführungsphase von Januar 98 bis Juni 99 ein marktreifes Produkt durch das Konsortium entwickelt werden.

2 Programmleistung

2.1 Beschreibung

Der multimediale Alpenführer AIDA ist ein Programm, das dem Anwender bei der Vorbereitung und Planung von Touren in ausgewählten Regionen sehr nützlich ist. Im Gegensatz zu marktüblichen CD-ROM-Produkten kann der Nutzer nicht nur Informationen über selektierte Touren abrufen, sondern auch eigene Touren zusammenstellen, die durch Eingabe nutzerspezifischer Parameter (Weglänge, Schwierigkeitsgrad, Übernachtungsmöglichkeiten u.a.) seinen persönlichen Bedürfnissen entsprechen.

Ergänzende multimediale Informationen, wie z.B. Tourenbeschreibungen, Sehenswürdigkeiten, Panoramablicke, liegen als Text, Bilder oder Videosequenzen vor und vermitteln einen realen Eindruck des ausgewählten Gebietes.

Des weiteren können persönliche Zusatzinformationen zu den ausgewählten Touren archiviert werden (Erstellen von Tourenbüchern), Stationslisten und berechnete Höhenprofile abgerufen sowie gewünschte Ergebnisse ausgedruckt werden (Karten, Höhenprofile, Text).

Die Kartendarstellung wird aus verschiedenen Maßstabsreihen des digitalen topographischen Kartenbestandes (Rasterformat) erzeugt. Zur Realisierung der Routing-Funktion werden Vektordaten des Wegenetzes erzeugt. Da die Planungsgebiete länderübergreifend gewählt wurden, liegen die Daten in verschiedenen Bezugssystemen vor. Hinzu kommen unterschiedliche Abgabe- und Nutzungsmodalitäten. Die Aufbereitung der Daten, die Transformation in ein einheitliches Bezugssystem und das Ho-

¹ Unter Mitwirkung von Prof. W. Caspary, Gerhard Joos, Lothar Koppers, Chengzu Li, Stefan Neudeck und Stefan Seeberger

mogenisieren des Datenbestandes an den Landesgrenzen ist nötig, um die verfügbaren heterogenen Daten gemeinsam nutzen zu können.

Zusätzlich stehen dem Anwender sorgfältig recherchierte Fachdaten, wie z.B. Übernachtungs- und Einkaufsmöglichkeiten, Freizeitaktivitäten, Fahrpläne, Parkplätze u.ä. zur Verfügung, die teils durch das Konsortium erhoben, teils aus anderen Quellen eingebunden werden konnten.

Die Entwicklung der Applikation gibt darüber hinaus den Anwendern mit Internetanschluß durch implementierte Hyperlinks Zugriff auf aktuelle Zusatzinformationen, wie z.B. Wetterdienste, Berichte über Schneehöhen, Lawinenwarnung oder Verkehrslage.

2.2 Funktionalitäten

Der Leistungsumfang des endgültigen Programmes wird die folgenden Funktionen beinhalten, die mit einer leicht zu bedienenden Oberfläche ausführbar sind:

- Abrufen festgelegter Touren
- Auswahl individueller Touren, die das Programm nach Eingabe benutzerspezifischer Parameter zusammenstellt (z.B. Weglänge, Schwierigkeitsgrad, Übernachtungsmöglichkeiten und Hütten)
- Auswahl individueller Touren durch Anklicken von Wegpunkten bzw. Wegkreuzungen
- Abfrage touristischer Informationen als Text, Bilder, Videosequenzen (z.B. Tourenbeschreibungen, Sehenswürdigkeiten, Panoramablicke, praktische Tips)
- Abspeichern persönlicher Zusatzinformationen (Erstellen von Tourenbüchern)
- Aktivieren der Anzeige berechneter Höhenprofile
- Abrufen von Stationslisten
- Abfrage aktueller Informationsinhalte aus dem Internet
- Drucken der gewünschten Ergebnisse (Karten, Höhenprofile, Stationslisten, Text)

Weiterhin wird eine GPS-Schnittstelle entwickelt, die den Datentransfer zu handlichen GPS-Empfängern erlaubt und damit eine Führung zu den aufgelisteten Stationen ermöglicht.

3 Konsortium

3.1 Projektpartner

Zur Durchführung des Projektes war die Zusammenarbeit von mindestens vier voneinander unabhängigen Einrichtungen notwendig, wobei mindestens zwei voneinander unabhängige Partner ihren Sitz nicht in demselben Mitgliedstaat der Europäischen Union haben durften. Es wurde ein Konsortium gebildet, das sich aus folgenden Beteiligten zusammensetzt: Firma Huber Kartographie (München), Arbeitsgemeinschaft GIS der Universität der Bundeswehr (München) sowie den kartographischen Firmen mapgraphic edition (Italien) und Sparrer (München).

3.2 Aufgaben der Projektpartner

3.2.1 Firma Huber Kartographie

Die Firma Huber Kartographie hat die Aufgabe des Projektkoordinators innerhalb des Konsortiums übernommen, da die hierfür notwendige Infrastruktur und das Equipment verfügbar ist.

Weiterhin hat die Firma Huber Kartographie wesentlichen Anteil an der Entwicklungsleistung für das Softwareprodukt, wie u.a. Gestaltung der Graphischen Benutzeroberfläche, Architektur der Software, Entwicklung des Routing-Algorithmus und Servers.

3.2.2 Arbeitsgemeinschaft GIS der Universität der Bundeswehr

Die Arbeitsgemeinschaft GIS der Universität der Bundeswehr übernimmt die Aufbereitung der heterogenen Datenbasis, damit diese im Softwareprodukt gemeinsam verarbeitet werden können. Es handelt sich hierbei um die Bearbeitung der Rasterdaten, d.h. Georeferenzierung in ein gemeinsames Referenzsystem/UTM, Homogenisierung an den Ländergrenzen und kartographische Aufbereitung. Die Fachdaten (Wanderwege, Loipen, Hütten etc.) werden digitalisiert. Aus dem digitalen Geländemodell wird die Höheninformation interpoliert und den digitalisierten Vektordaten beigelegt, so daß die Ableitung von Höhenprofilen realisiert werden kann. Die touristischen Fachdaten, wie Freizeiteinrichtungen und Dienstleistungen werden ebenfalls digitalisiert, damit der Geobezug für die Anbindung der zugehörigen Sachdaten verfügbar ist.

Weiterhin ist die Arbeitsgemeinschaft GIS an der Entwicklung des Programmes beteiligt. Es handelt sich in der Durchführungsphase um die Erweiterung der Funktionalitäten, Entwicklung der Graphischen Oberfläche und Entwicklung einer GPS-Schnittstelle.

3.2.3 Mapgraphic edition und Firma Sparrer Kartographie

Während der Definitionsphase waren diese beiden kartographischen kleinen mittleren Unternehmen (KMU) mit der Beschaffung der relevanten Fachdaten vor Ort und dem Herstellen von Kontakten betraut. Es hat sich gezeigt, daß diese Art der Fachdatenrecherche (Wegedaten, Geländeerkundung) wirtschaftlich nicht haltbar ist. Die Beschaffung der Fachdaten muß daher aus bereits vorhandenen Datensammlungen erfolgen.

In der Durchführungsphase werden die Firmen mapgraphic edition und Sparrer daher die von den Alpenvereinen, Fremdenverkehrsämtern und anderen möglichen Datenlieferanten zur Verfügung gestellten Informationen redaktionell für den Digitalisiervorgang aufbereiten.

4 Datenbasis

4.1 Aufbau der Datenbasis

Für die Darstellung ausgewählter grenzüberschreitender Alpenregionen ist die Beschaffung von digitalen Daten der jeweils zuständigen Vermessungsverwaltung nötig. Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die im Endprodukt geplante Datenpalette. Die Daten für die Länder Österreich und Deutschland wurden bereits während der Definitionsphase für die Implementation des Testgebietes Wettersteingebirge im Prototypen beschafft, homogenisiert und integriert.

Datenquelle/Datenart	Datentyp	Maßstab	Format	Auflösung
Deutschland/Bayerisches Landesvermessungsamt				
Basisdaten	Raster	TK 50	*.tif	200 Linien/cm
Österreich/Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen				
Basisdaten	Raster	TK 50	*.tif	200 Linien/cm
Italien/Autonome Provinz Bozen				
Basisdaten	Raster	TK 10	*.tif	200 Linien/cm
AIDA-Konsortium/mapgraphic edition und Sparrer				
Fachdaten/analoge Quelle	Vektordaten		*.asc	
AIDA-Konsortium/Arbeitsgemeinschaft GIS				
Wegenetz/analoge Quelle	Vektordaten		*.asc	

Tabelle 1: Datengrundlage für den Multimedialen Alpenführer AIDA

Die Datengrundlagen der betreffenden Landesvermessungsämter bilden die Basisdaten im Alpenführer. Für die kartographische Darstellung werden die amtlichen Rasterdaten, im Maßstab 1:50.000 als Hintergrundkarte aufbereitet.

In der Definitionsphase wurden zum einen notwendige Detailinformationen, wie z.B. Informationen über Bergbahnen und Lifte, Wegebeschaffenheit, Hütten etc., durch das Konsortium recherchiert, um diese dem Nutzer zur Verfügung zu stellen. Zum anderen kann durch eine Verbindung zu den Alpenvereinen qualitativ hochwertige vorhandene Informationen für AIDA nutzbar gemacht und dem Anwender auf diese Weise zugänglich gemacht werden. Auch ist denkbar, die großmaßstäblichen Alpenvereinskarten über touristisch besonders interessante Gebiete, einzubinden.

Multimediale Daten, wie z.B. Bilder über Einkehrmöglichkeiten oder Sehenswürdigkeiten und Videosequenzen von Panoramablicken oder interessanten Wegabschnitten werden teilweise von den Gemeinden bzw. Fremdenverkehrsbüros zur Verfügung gestellt oder von Agenturen bezogen.

4.2 Fortführung

Die Verwendung der digitalen Grunddaten der jeweiligen Landesvermessungsämter garantiert zum einen eine qualitativ hochwertige Datenbasis und zum anderen einen regelmäßigen Fortführungszyklus, so daß stets aktuelle Informationen verfügbar sind. Ein digitales Verzeichnis der italienischen, französischen, schweizerischen und deutschen Hütten wird gerade vom Deutschen Alpenverein (Servicezentrum) aufgebaut. Aktuelle Informationen über Hütten können direkt über die Sektionen bezogen werden.

Nach den in der Definitionsphase entwickelten Methoden werden die Daten der beteiligten Länder aufbereitet und in das Produkt eingebunden. Die Weitergabe von Fortführungsdaten (Rasterdaten) an den Nutzer des Tourenplaners kann über ein CD-ROM-Update und die aktualisierten Vektordaten per Internet erfolgen. Wegen der derzeit noch geringen Datenübertragungsraten via Internet ist geplant, lediglich Vektordaten und Fachinformationen dem Nutzer auf diesem Wege zu übermitteln. Da Veränderungen in den Vektordatenbeständen Auswirkungen auf die Tourenzusammenstellung haben, ist es wichtig, diese Aktualisierungen rasch an den Nutzer, d.h. via Internet, weiterzugeben. Die speicherintensiven Rasterdaten, die lediglich als Hintergrundinformation dienen, werden durch Neuauflage einer CD-ROM aktualisiert, so lange die Datenübertragungsraten im Netz für große Datenmengen nicht akzeptabel sind.

4.3 Abgabe- und Nutzungsmodalitäten

Die Abgabe- und Nutzungsmodalitäten variieren in den verschiedenen Ländern. Zum Kaufpreis der Daten kommt noch eine Lizenzgebühr (Nutzungsgebühr) dazu, die auflagenabhängig sein kann, oder einen bestimmten Prozentsatz des Nettoverkaufspreises betragen kann.

Nicht geklärt sind die Abgabebedingungen bei der Verwendung der Daten über das Internet. Allgemein kann aufgrund der unsicheren Rechtslage vorerst keine Nutzungsgenehmigung der amtlichen Daten für das Internet erteilt werden. Eine in diesem Zusammenhang ausstehende Entscheidung von seiten der Europäischen Union wird von den Landesvermessungsämtern noch abgewartet.

5 Datenaufbereitung und -integration

5.1 Rasterdaten

Es liegen die gescannten topographischen Karten des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (BEV) und Bayerischen Landesvermessungsamtes (BLVA) im Maßstab 1:50.000 *.tif-Format vor. Diese Daten werden zur gemeinsamen Weiterverarbeitung im ersten Schritt aus den unterschiedlichen

Referenzsystemen in ein einheitliches Bezugssystem (UTM, WGS84) überführt und liegen dann georeferenziert vor. Die bayerischen Daten werden von Gauß-Krüger-Koordinaten (GKK) direkt in die Koordinaten der Universal-Transversal-Mercator-Projektion (UTM), nach Ermittlung der Parameter der Datumstransformation, überführt. Bei den österreichischen Daten erfolgt die Umrechnung der geographischen Blatteckkoordinaten (vorliegend im „Ferro-System“) in das System von Greenwich und nach Ermittlung der GKK (Bessel) aus den geographischen Koordinaten erfolgt die Umrechnung in das UTM-System. Das Know-how für die Georeferenzierung ist am Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr vorhanden und das Verfahren in der Definitionsphase entsprechend entwickelt worden.

Die Daten aus den in der Durchführungsphase zu integrierenden europäischen Ländern Österreich und Italien werden in Abhängigkeit der jeweils gültigen Parameter gleichermaßen aufbereitet.

Land	Ausgangsparameter der Datengrundlage
Deutschland	Gauß-Krüger (Bessel-Ellipsoid)
Österreich	Gauß-Krüger (Bessel-Ellipsoid), Null-Meridian Ferro, 17° 39' 46" w.v.Gr.
Italien	Gauß-Boaga (Internationales Ellipsoid 1909)

Tabelle 2: Ausgangswerte der internationalen Datengrundlage - Georeferenzierung nach UTM (WGS84)

Nach erfolgter Georeferenzierung werden die Rasterbilder in den Grenzbereichen homogenisiert, damit sie aneinandergepaßt und als zusammenhängender grenzüberschreitender Datenbestand weiterverwendet werden können.

5.2 Vektordaten

Linienhafte Objekte	Attribute	Punkthafte Objekte	Attribute
Eisenbahn Wanderweg Radweg Klettersteig/Pfadspur Schiffahrtslinie Zahnradbahn Seilbahn Sessellift Schlepplift	Name Nr. des Weges Markierung Eigenschaft des Weges (steil, schwierig)	Jugendherberge Campingplatz Unterkunftshaus Hotel/Pension Hütte Hallenbad Freibad Tourismusinformation Sonstige Adressen Parkplatz Haltestellen Naturdenkmal Denkmal/Denkstein Aussichtspunkt/-turm Kirche/Kloster/Kapelle Schloß/Burg/Ruine Museum/Galerie Sonstige Sehenswürdigkeiten Rastplatz Spielplatz Grillplatz/Feuerstelle Orientierungstafel Gipfel	Name Adresse Tel.Nr. Öffn.Zeiten Eintrittspreise Bild Video. u.a.

Tabelle 3: Im Programm AIDA enthaltene Objekte

Da die für AIDA benötigten Vektordaten (Rad- und Wanderwege, geocodierte touristische Informationen) nicht in der amtlichen Datenbasis des Amtlichen Kartographischen Informationssystems (ATKIS) enthalten sind, werden diese durch die Arbeitsgemeinschaft GIS produziert. Nachdem ein Datenmodell hierfür erstellt wurde, werden die Daten in der MGE-Umgebung (Intergraph) erfaßt, geprüft und über eine ASCII-Schnittstelle (Koordinatensystem UTM/WGS84) an die Fa. Huber weitergegeben, damit sie in die Datenbank integriert werden können. Da UTM/WGS84 auch die Basis für das Global Positioning System (GPS) darstellt, lassen sich mit GPS-Empfängern gewonnene Koordinaten ohne Konvertierung in das System AIDA integrieren.

Nach Vorlage des gesamten, für den Alpenführer relevanten Wegenetzes, muß die Höheninformation den Wegekoordinaten zugefügt werden, damit bei der Tourenauswahl ein der speziellen Tour zugehöriges Höhenprofil berechnet und abgerufen werden kann. Dies wird durch Verschneidung der Wegedaten mit dem digitalen Höhenmodell erzielt.

5.3 Semantische Daten

Notwendige semantische Daten, wie z.B. Tourenbeschreibungen, Adressen für Freizeiteinrichtungen und Dienstleistungen, Informationen über Bergbahnen und Lifte, Hütten u.v.m. werden durch das Konsortium recherchiert, um diese dem Nutzer zur Verfügung zu stellen. Es hat sich allerdings gezeigt, daß diese Vorgehensweise sehr aufwendig ist. Es wird daher auf bereits bestehende Datenbestände zugegriffen, wie z.B. Informationsbestände der Fremdenverkehrsämter oder des Alpenvereins.

5.4 Digitales Höhenmodell (DHM)

Entsprechend dem o. g. Bearbeitungsschritt werden die Höheninformationen dem Wegenetz zugeordnet und ermöglichen die Darstellung der Höhenunterschiede, die der jeweils abgerufenen, individuell zusammengestellten Tour entsprechen.

5.5 Multi-Media-Daten

Bild-, Audio- und Videodaten können in allen gängigen Formaten Verwendung finden. Die Daten liegen als File auf der CD-ROM und über einen Link in der Datenbank kann auf sie zugegriffen werden. Die für die Datenwiedergabe notwendige Softwareausstattung gehört zum Lieferumfang der marktüblichen Betriebssysteme (ab Windows 3x).

6 Entwicklungsumgebung

Die Programmentwicklung erfolgt unter den Betriebssystemen Windows95 und NT4.0. Die verwendeten Entwicklungsplattformen sind mit Prozessoren ab Pentium 90MHz und Arbeitsspeicher ab 32MB ausgestattet.

Die Applikation wird erzeugt mit der Programmiersprache VisualC++ 5.0. Es handelt sich um eine komplexe C++ Entwicklungsumgebung. Die Oberfläche der Applikation wird einer Win32-Applikation ähnlich sein, damit der Nutzer sich schnell zurecht findet und ähnliche Funktionen aus anderen Programmen wiedererkennt.

7 Entwicklungsergebnis (Prototyp)

Zum Ende der Definitionsphase lag als Ergebnis ein Prototyp des multimedialen Alpenführers vor, bei dem der größte Teil der Funktionalitäten bereits realisiert war. Die Datengrundlage erstreckt sich über die Region Wettersteingebirge, von Garmisch-Partenkirchen (Deutschland) bis Ehrwald (Österreich). Die Gesamtausdehnung umfaßt insgesamt ca. 333 km², wobei ca. 2/3 auf deutsches Gebiet und ca. 1/3

der Fläche auf österreichisches Gebiet entfallen. In diesem Testgebiet sind ca. 6.500 Wege enthalten und 170 touristisch interessante Objekte. Das gesamte Wegenetz hat eine Ausdehnung von 1.402 km Länge (incl. Straßen und Eisenbahn). Es ergibt sich somit auf 1 km² Fläche ein durchschnittliches Wegenetz von ca. 4,2 km.

Die eingebundenen amtlichen Daten wurden vom Bayerischen Landesvermessungsamt in München und dem Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen in Wien bezogen.

8 Ausblick

Da nun zwischenzeitlich die Zusage für die Weiterförderung durch die Europäische Gemeinschaft vorliegt, kann während der 1,5jährigen Durchführungsphase ein marktreifes Produkt entwickelt werden. Das bedeutet, daß entwicklungstechnisch die bereits vorhandenen Funktionen ausgereift und stabilisiert werden, noch fehlende Funktionen (z.B. GPS, Drucken) hinzugefügt werden und generell die Performanz verbessert wird. Für die ausgewählten Gebiete² müssen die Datengrundlagen beschafft und entsprechend aufbereitet sowie die Vermarktung und der Vertrieb des Produktes in die Wege geleitet werden. Die technischen Voraussetzungen von AIDA erlauben es, Informationsaustausch über Internet vorzunehmen, sobald die rechtlichen Aspekte bezüglich des Datentransfers der amtlichen Daten via Internet geklärt sind.

Kritiker führen an, daß es prinzipiell viel angenehmer sei, ein Buch zur Planung einer Tour heranzuziehen und aktuelle Informationen nicht so wichtig seien. Betrachtet man allerdings die Entwicklung der PC-Software der letzten 5 Jahre, so wird deutlich, daß viele Nutzer sich der bequemen Internet-Dienste bedienen und Homebanking oder Versandhausbestellungen keine Ausnahme mehr sind. Auch mit dem Softwareprodukt AIDA könnten Hotelbuchungen und Hüttenreservierungen möglich werden. Denkbar ist auch die Einrichtung einer Informationsbörse, wodurch individuelle Informationen über Touren und Besonderheiten anderen interessierten Nutzern zugänglich gemacht werden können.

² 1. Region Wettersteingebirge
2. Erweiterung der Region - Allgäuer Alpen, Kaisergebirge
3. Ergänzung südliche Region - Innsbruck bis Bozen, Dolomiten

TRANSAKTIONSMECHANISMEN BEI DER VERWALTUNG VON GEODATEN IN EINER MULTIUSER-UMGEBUNG

Dipl.-Ing. Stefan Neudeck

Institut für Geodäsie
Universität der Bundeswehr München
85577 Neubiberg

Zusammenfassung

In diesem Beitrag stehen Eigenschaften der Transaktionsverarbeitung bei Geo-Informationssystemen in einer Multiuser-Umgebung im Vordergrund. Vorangestellt werden Transaktionskonzepte für Datenbanken allgemein, untersucht wird die diesbezügliche Rolle des Raumbezugs (Geometrie) bei Geo-Informationssystemen. Transaktionsmechanismen, welche die Realisierung einer echten Multiuser-Umgebung für eine GIS-Anwendung ermöglichen, werden beschrieben. Besondere Aufmerksamkeit wird dem Zusammenführen von Geometrien verschiedener Bearbeitungsstände gewidmet. Dargestellt werden Transaktionsmechanismen anhand eines Applikationsbeispiels, das in der Arbeitsgemeinschaft Geo-Informationssysteme, Universität der Bundeswehr München, realisiert wird.

1 Transaktionskonzepte

1.1 Einführung

Der folgende Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über verschiedene Transaktionskonzepte. Die Eigenschaften von Transaktionen im Bereich von Datenbanken in einer Multiuser-Umgebung werden kurz wiedergegeben. Außerdem wird auf Unterschiede zwischen den dortigen Konzepten und denen bei Geo-Informationssystemen eingegangen. Bei letzteren erlaubt das Vorhandensein von Geometrie Transaktionsmechanismen, die einen gleichzeitigen Zugriff mehrerer Bearbeiter auf ein Geo-Objekt zulassen.

1.2 Transaktion und lange Transaktion

1.2.1 Transaktion

Die Transaktion stellt eine endliche Folge von Operationen als einen Arbeitsschritt dar. Sie überführt Daten eines konsistenten Zustands in einen neuen konsistenten Zustand. Durch die einzelnen Operationen des Transaktionsprozesses entstehen hingegen vorübergehend inkonsistente Zustände, die aber nicht einzeln gespeichert werden können. Nach Abbruch einer Transaktion wird keine Operation durchgeführt. Der Zustand zu Transaktionsbeginn wird wieder hergestellt, indem alle Änderungen zurückgesetzt werden (ROLLBACK). Nach dem erfolgreichen Abschluß der Transaktion (COMMIT) ist ein neuer konsistenter Zustand erreicht. Sowohl nach COMMIT als auch nach ROLLBACK wird eine neue Transaktion eröffnet.

Im Multiuser-Betrieb werden einzelne Tabellen bzw. Records zu Transaktionsbeginn für einen zweiten Bearbeiter zumindest zum Schreiben gesperrt, um Inkonsistenzen bei gleichzeitigem Zugriff auszuschließen (Es gibt Konzepte, bei denen das Lesen für andere Bearbeiter möglich ist). Dieser kann erst mit den gesperrten Daten arbeiten, wenn derjenige, der als erster auf die benötigten Tabellen zugreift, seine Transaktion abgeschlossen hat. Inkonsistenzen können nur auftreten, wenn die nacheinander durchgeführten Änderungen zweier Bearbeiter fachlich nicht konsistent sind. Abbildung 1.1 zeigt schematisch einen Transaktionsprozeß.

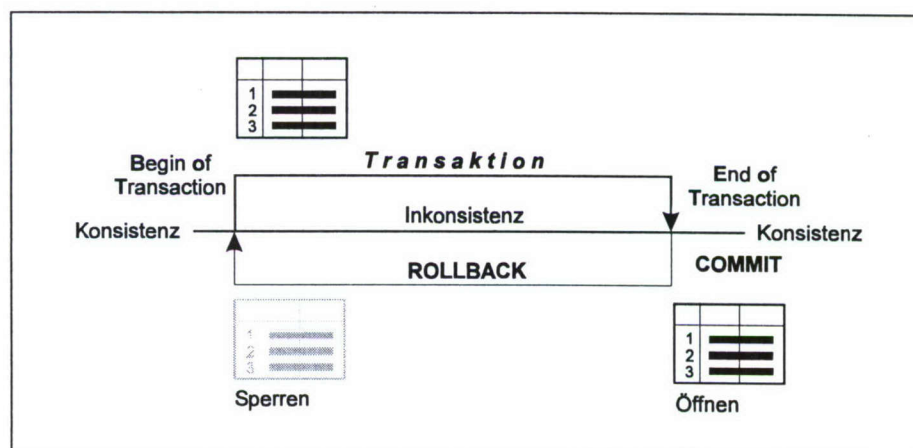


Abbildung 1.1: Transaktion (nach GRAY/REUTER 1993)

1.2.2 Lange Transaktion

Das Verfahren der langen Transaktion sagt aus, daß von einem konsistenten Original eine Kopie angefertigt wird, auf der alle Änderungen vollzogen werden. Da in einer Multiuser-Umgebung mehrere Bearbeiter diese Kopie anlegen können, ist bei Nutzung dieses Transaktionskonzeptes die parallele Bearbeitung gleicher Daten möglich. Sobald die Arbeitskopie angefertigt ist, arbeitet der Nutzer lokal auf seinen Daten. Ein Zugriff von außerhalb (weiterer Bearbeiter) auf die Kopie ist ausgeschlossen. Während der Bearbeitung bleibt das Original unverändert. Nach der Bearbeitung muß die Kopie mit dem evtl. zwischenzeitlich durch Zurückschreiben eines anderen Bearbeiters geänderten Original abgeglichen werden. Zur Aufdeckung fachlicher Inkonsistenzen dient ein Konsistenztest (s. Kap. 2.5). Danach ist zu entscheiden, ob die Transaktion abgebrochen (ROLLBACK) wird oder ob die geänderte Geometrie auf das Original (COMMIT) zurückzuschreiben ist. Mit dem Verfahren der langen Transaktion wurde die Multiuser-Umgebung für die Applikation „Ausweisung von Schutzgebieten“ realisiert. Es steht im Kap. 2 bei der Beschreibung der Transaktionsmechanismen im Mittelpunkt der Betrachtungen.

1.3 Transaktionskonzepte bei Geo-Informationssystemen

Geo-Informationssysteme unterscheiden sich durch ihren Raumbezug bzw. das Vorhandensein von Geometrien von anderen Informationssystemen. Der Zugriff auf die Daten ist über die Geometrie möglich. Im Geometriebereich liegen erweiterte Möglichkeiten für die Realisierung eines Transaktionsmechanismus'. Es können Ergebnisse erreicht werden, die den Anforderungen einer echten Multiuser-Umgebung entsprechen.

1.3.1 Spezielle Eigenschaften

Prinzipiell ist im GIS-Bereich die relative Lage zweier Anwendungsgebiete von Bedeutung. Damit ist die Unterscheidung von sich überschneidenden und sich nicht überschneidenden Bearbeitungsgebieten gemeint. Die relative Lage zweier Anwendungsgebiete zueinander spielt dann eine Rolle, wenn zwei Bearbeiter ein Feature (z. B. Polygon) bearbeiten, aber nicht im gleichen Bereich dieses Objektes Änderungen durchführen. Eine mögliche Lösung, für diesen Fall die gleichzeitige Bearbeitung zu ermöglichen, ist die Definition von Berechtigungszonen. Durch Berechtigungszonen wird der Bereich, welcher für einen zweiten Bearbeiter gesperrt ist, auf einen Teil des betreffenden Objektes beschränkt (vgl. BARTELME 1994, S. 339 f.). In der Praxis können solche Zonen durch die Definition eines Rechtecks festgelegt werden. Der in der Rechteckfläche liegende Bereich der Geometrie wird ausgeschnitten und als „eigener“ Geometriedatensatz aufgefaßt, auf den dann kein weiterer Anwender Zugriff hat.

1.3.2 Transaktionskonzepte in Arc/Info

Die Applikation zur Ausweisung von Schutzgebieten wird in der Makrosprache (Arc Macro Language, AML) der GIS-Software Arc/Info von ESRI programmiert. Arc/Info verfügt auch über vorgefertigte Konzepte zur Transaktionsverarbeitung, die im folgenden kurz beschrieben werden, obwohl sie der Funktionalität einer echten Multiuser-Umgebung nicht entsprechen.

Für die Bewältigung einfacher Transaktionsprozesse unter Arcedit, dem graphischen Editor von Arc/Info, dient das Kommando TRANSACTION, mit dem begrenzt durch BEGIN und END eine Folge von Arbeitsschritten zu einer Transaktion zusammengefaßt wird. Das Arc/Info-Modul zur Speicherung von Daten in einer Multiuser-Umgebung ist ArcStorm (Arc Storage Manager). ArcStorm erlaubt Transaktionen bis auf die Ebene einzelner Objekte (Features). Während der Bearbeitung eines Features ist dieses aber gemäß dem einfachen Transaktionskonzept für einen zweiten Bearbeiter ebenfalls gesperrt.

2 Transaktionsmechanismus für die Applikation

Im folgenden wird der Transaktionsmechanismus beschrieben, mit dem der Multiuser-Betrieb der beim Thüringer Landesverwaltungsamt angewendeten Applikation realisiert wird. Zuvor sind aber einführende Bemerkungen zur Funktionalität der Applikation notwendig, die zum besseren Verständnis beitragen.

2.1 Funktionen der Applikation zur Ausweisung von Schutzgebieten

Mit der Applikation „Ausweisung von Schutzgebieten“, die in den Jahren 1994 bis 1996 in der Arbeitsgemeinschaft GIS, Universität der Bundeswehr München, für das Thüringer Landesverwaltungsamt Weimar geschrieben wurde, wird ein Sachbearbeiter in allen Arbeitsschritten bei der Ausweisung eines Natur- oder Landschaftsschutzgebietes unterstützt. Es handelt sich dabei um die Bearbeitung von Geometrien, die Erfassung und Änderung von Schutzgebietsgrenzen. Ein Vorgang der Geometriebearbeitung wird dabei als „Verfahren“ bzw. „Ausweisungsverfahren“ bezeichnet.

Die Applikation ist in der anstehenden Erweiterungsphase auf die Realisierung eines echten Multiuser-Betriebes auszudehnen, so daß mehrere Sachbearbeiter parallel auf die gleiche Geometrie zugreifen können. Von verschiedenen Arbeitsplatzrechnern ist dabei über eine Terminalemulation (Exceed), welche die X-Terminal-Oberfläche der Workstation überträgt, der gleichzeitige Zugriff auf Datenbank und Geometriedaten möglich.

2.2 Anforderungen an den Transaktionsmechanismus

Der Weg für die Realisierung des Transaktionsmechanismus' für die Multiuser-Umgebung der Applikation richtet sich nach den Anforderungen, die an diese Umgebung gestellt werden. Die zentrale Forderung an den Mechanismus ist:

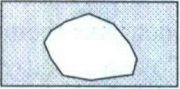

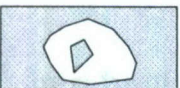
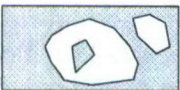
- die Möglichkeit der *parallelen* Bearbeitung *einer* Geometrie durch mehrere Anwender

Das Sperren von Objekten für einen zweiten Bearbeiter muß ausgeschlossen werden, da auf einem Schutzgebietspolygon, v. a. wenn es eine große Flächenausdehnung erreicht (bei Landschaftsschutzgebieten, z. B. Thüringer Wald) mehrere Verfahren laufen, die Geometrie für mehrere Bearbeiter „offen“ sein muß, damit diese Verfahren gleichzeitig bearbeitet werden können. Somit wird einer echten Multiuser-Umgebung Rechnung getragen. Da vorgegebene Modelle zur Realisierung nicht die gewünschte Funktionalität aufweisen, muß eine Lösung, die überwiegend auf den umfangreichen Geometriefunktionen von Arc/Info beruht, gefunden werden. Sie baut, wie bereits erwähnt, auf dem Verfahren der langen Transaktion auf, da nur so die reibungslose Geometriebearbeitung und Datenkonsistenz garantiert werden können. Dabei sind auch die Eigenschaften der Schutzgebietsgeometrien von Bedeutung. Die wesentlichen Unterschiede ihrer räumlichen Formen werden im folgenden kurz beschrieben.

2.3 Eigenschaften von Schutzgebietsgeometrien

Die bearbeiteten Geometrien verfügen über spezielle Eigenschaften, die in Tabelle 2.1 zusammengefaßt werden.

Tabelle 2.1: Eigenschaften von Schutzgebietsgeometrien

Name	Form	Bemerkungen
a) Polygon		Das Schutzgebiet besteht aus einem einzelnen Fläche.
b) Polygon mit Außenpolygon(en)		Das Schutzgebiet besteht aus mehreren Flächen (Außenpolygone).
c) Polygon mit Binnenabgrenzung(en)		Innerhalb der Schutzgebietsfläche existieren Binnenabgrenzungen, d. h. Flächen, die nicht zum Schutzgebiet gehören, aber ganz von dessen Fläche umschlossen werden.
d) Kombination		Die Eigenschaften von a), b) und c) sind Bestandteil eines Schutzgebietes

In Arc/Info gibt es für Flächen mit den in Tab. 2.1 genannten Eigenschaften den Datentyp der *Region*. Neben den Geometrieigenschaften muß beim Transaktionsmechanismus auch dieser Datentyp berücksichtigt werden. Er wirkt aber bei der Realisierung nicht hinderlich, da Regions bei Anwendung der Verschneidungsfunktionen genau so bearbeitet werden wie sonstige Geometrien. Zweck des Datentypes ist es, mehrere Polygone (Fall „b“ und „d“ in Tab. 2.1) als ein Objekt zusammenzufassen. So werden räumlich nicht zusammenhängende Flächen als Einheit modelliert. Einzelpolygone („a“ und „c“) können ebenfalls als Region modelliert werden.

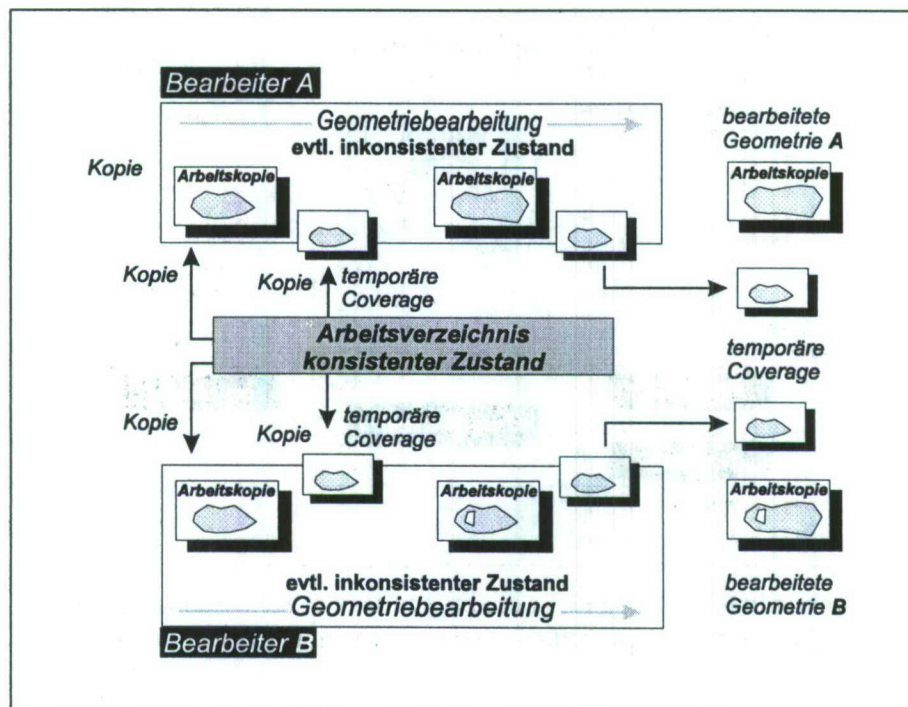


Abbildung 2.1: Beispiel für das Verfahren der langen Transaktion bei der Geometriebearbeitung

2.4 Arbeitskopie, Geometriebearbeitung

Zur Realisierung der langen Transaktion wird zu Beginn der Geometriebearbeitung eine Kopie vom Original angelegt. In dieser Arbeitskopie nimmt der Anwender seine Änderungen mit Hilfe der AML-programmierten Benutzeroberfläche vor. Als Original dient dabei die Geometrie im Arbeitsverzeichnis. Neben der Arbeitskarte wird zu Beginn der Geometriebearbeitung eine zweite Kopie angelegt, die während des Bearbeitungsprozesses als temporäre Coverage mitgeführt wird. Auf dieser Kopie werden keine Änderungen durchgeführt. Sie spielt erst beim Transaktionsabschluß nach Durchführung der Geometrieänderungen eine Rolle. Andere Bearbeiter können die gleichen Schritte ausführen und ihre Verfahren bearbeiten. Den Vorgang der langen Transaktion für die Geometriebearbeitung zeigt Abbildung 2.1.

2.5 Transaktionsfortgang nach der Geometriebearbeitung

Um den Fortbestand eines fachlich konsistenten Datenbestandes permanent zu gewährleisten, muß die aktualisierte Geometrie nach Beendigung der Geometriebearbeitung mit dem Original abgeglichen werden, da dieses sich zwischenzeitlich durch Prozesse anderer Bearbeiter geändert haben kann. Zum Vergleich, zur anschließend folgenden Entscheidung über Transaktionsabschluß bzw. -abbruch und zur weiteren Verarbeitung der Geometrie beim erstgenannten wurde ein Mechanismus entwickelt, der die Transaktionsverarbeitung allein auf Grundlage der Geometriefunktionen von Arc/Info ermöglicht.

Der Vergleich erfolgt zwischen der mitgeführten temporären Coverage (s. o.) und einer Kopie des aktuellen Standes im Arbeitsverzeichnis. Verglichen wird nur über die geometrischen Formen der Polygone, die am Bildschirm graphisch überlagert werden. Abbildung 2.2 zeigt die möglichen Ergebnisse dieses Konsistenztests.

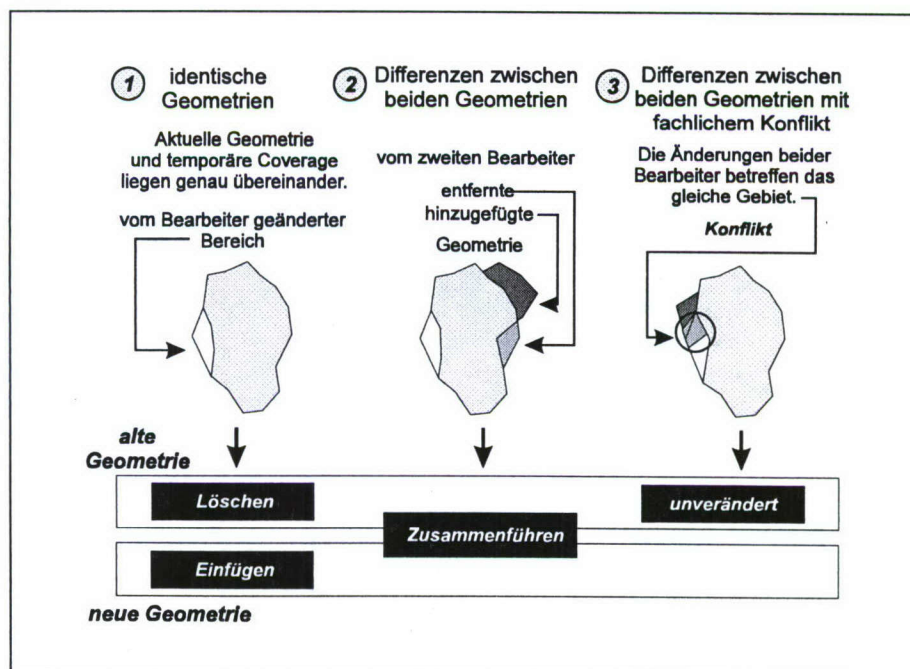


Abbildung 2.2: Beispiel für die Ergebnisse des Konsistenztests und ihre Auswirkungen auf die Weiterbearbeitung der Geometrien

Zur Abbildung:

- Fall 1: Hier kann die Transaktion erfolgreich zu Ende geführt werden. Die beiden übereinander liegenden Geometrien sind identisch, kein anderer Bearbeiter hat sie zwischenzeitlich geändert. Zur Beendigung des Transaktionsprozesses wird die neue Geometrie anstelle der alten in das Arbeitsverzeichnis eingefügt.
- Fall 2: In diesem Fall wird die Transaktion ebenfalls erfolgreich abgeschlossen. Ein zweiter Bearbeiter hat die Geometrie zwischenzeitlich in einer anderen Anwendungszone vollzogen. Um den konsistenten Zustand zu erhalten, müssen beide Geometrien miteinander verschmolzen werden. Den aufwendigen Vorgang des Zusammenführens von Geometrien beschreibt Kap. 2.6.
- Fall 3: Im gekennzeichneten Bereich haben beide Bearbeiter Änderungen an der Geometrie vorgenommen. Hier tritt eine fachliche Inkonsistenz auf, so daß die Transaktion nicht zu Ende geführt werden kann. Durch den notwendigen Transaktionsabbruch bleibt der vorhandene konsistente Zustand erhalten.

Die Entscheidung über den Transaktionsabschluß durch Einfügen, Zusammenführen oder Abbrechen liegt allein beim Bearbeiter, eine Konflikterkennung durch das System ist ohne großen Aufwand nicht möglich. Denkbar wäre allerdings, daß die Koordinaten der geometrischen Ausdehnung (Mapextent) der Bereiche, in denen von den Bearbeitern Änderungen vorgenommen wurden (s. a. Abb. 2.3), verglichen werden. Sollten beide Mapextents mindestens in einem kleinen Teil gleiche Flächen beinhalten, könnte ein Konflikt vorliegen, der vom System erkannt wird. Eine sichere Konflikterkennung ist auf diesem Weg aber nicht möglich, da die Mapextent-Koordinaten zum einen nicht genau der Geometrieausdehnung entsprechen und zum anderen bei Editierung der Geometrie gleich bleiben.

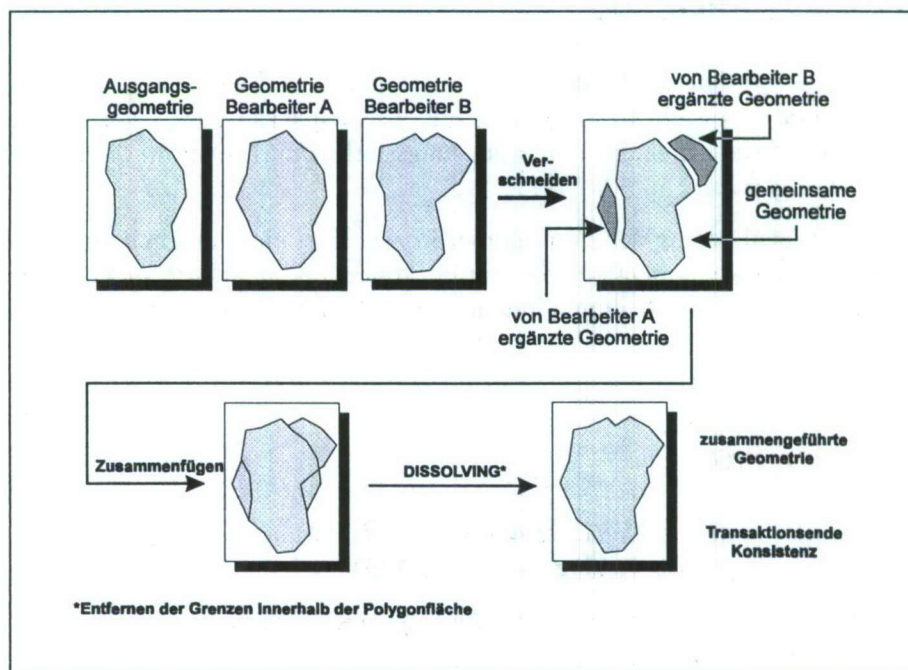


Abbildung 2.3: Beispiel für den Mechanismus beim Zusammenführen von Geometrien

2.6 Zusammenführen von Geometrien

Die Zusammenführung der vom Bearbeiter geänderten Geometrie mit jener im Arbeitsverzeichnis wird dann notwendig, wenn das Original zwischenzeitlich durch einen anderen Bearbeiter geändert wurde (Fall 2 in Abb. 2.2) und eine Nachführung desselben nicht durch einfaches Ersetzen der Geometrie (Fall 1 in Abb. 2.2) möglich ist. Die Zusammenführung beider beteiligten Geometrien erfolgt ausschließlich über die umfangreichen Geometriefunktionen von Arc/Info. Damit sind speziell die

verschiedenen Mengenoperationen (Verschneidungsfunktionen) gemeint. Nur ein Mechanismus, der auf diesen Funktionen aufbaut, erlaubt eine fehlerfreies Verschmelzen beider Datenbestände, so daß ein Sperren von Geometriedaten zur Bearbeitung durch mehrere Nutzer verhindert wird. Die Geometriefunktionen werden so genutzt, daß die beiden zu vereinigenden Coverages erst in ihre Einzelbestandteile zerlegt werden und anschließend die Teile, welche die zusammengeführte Geometrie repräsentieren, wieder zu einem Ganzen zusammengesetzt werden. Abbildung 2.3 verdeutlicht die Zusammenhänge.

2.7 Transaktionsende

Nach dem Zurückschreiben in das Arbeitsverzeichnis liegt dort in der Regel ein neuer Stand der Geometrie vor. Für weitere Bearbeitungen der gleichen Geometrie wird die Arbeitskopie jetzt aus den aktualisierten Daten kopiert.

Mit jedem Zurückschreiben in das Arbeitsverzeichnis wird ein weiterer Prozeß gestartet, der den Stand der Geometrie bei Transaktionsabschluß kopiert. Alle im Verlauf der Bearbeitung entstandenen Kopien zusammen zeigen den Stand der Geometrie (in der Applikation: Schutzgebietsgrenze) zu bestimmten Bearbeitungsständen. Diese Archivierung der Geometrie ist wesentlicher Bestandteil der Applikation, da so der Verlauf der Schutzgebietsgrenze zu jeder Zeit nachvollziehbar ist.

3 Abschließende Betrachtung

Im Beitrag wurde gezeigt, daß zur Realisierung einer echten Multiuser-Umgebung nach dem Verfahren der langen Transaktion über den Zugriff auf die Geometrie eines Geo-Informationssystems möglich ist. Die GIS-Software muß dabei über leistungsstarke Funktionen im Bereich der Verschneidungsoperationen verfügen.

Eine vollständige Automatisierung des Transaktionsprozesses ist nicht möglich, da fachliche Inkonsistenzen (Konflikte) vom System nicht erkannt werden können. Dies ist auch nicht notwendig, da Mechanismen entwickelt wurden, die durch interaktives Eingreifen eine fehlerfreie Bearbeitung ermöglichen.

4 Literaturverzeichnis

BARTELME, N.: *Geoinformatik - Modelle, Strukturen, Funktionen*.
Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1994

GRAY, J., A. REUTER: *Transaction Processing - Concepts and Techniques*
Kaufmann Publishers Inc., 1993

ELLIPTISCHE PUNKTBEWEGUNGEN

Burghard Richter
Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Marstallplatz 8, 80539 München

Zusammenfassung

Periodische oder quasiperiodische zweidimensionale Prozesse, wie zum Beispiel die Nutation oder die Polbewegung der Erdachse, sind dadurch charakterisiert, dass jeder einzelne Term einen Ellipsenumlauf eines Punktes auf einer Ebenen beschreibt. Für die allgemeine Ellipsenbewegung sowie für verschiedene Sonderfälle (Ellipse in Hauptachsenlage, Kreis) werden unterschiedliche Parametrisierungen aufgestellt und die Transformationen zwischen den Koeffizientensätzen angegeben.

Es wird gezeigt, dass ein Ellipsenumlauf eines Punktes als Summe zweier konzentrischer, gegensinniger Kreisumläufe mit gleicher Umlaufdauer, aber im allgemeinen unterschiedlichen Radien dargestellt werden kann (prograder und retrograder Umlauf). Damit ergibt sich eine neue anschauliche Definition einer Ellipse: Sie ist die Menge der Punkte, deren Ortsvektoren jeweils die Summe der beiden Ortsvektoren einander zugeordneter Punkte zweier Kreise sind. Dies ergibt eine einfache Konstruktionsmethode für Ellipsen.

1 Einleitung

Die Richtungsänderung des Rotationsvektors der Erde, sowohl relativ zu einem raumfesten Bezugssystem als auch relativ zu einem erdfesten Bezugssystem, setzt sich aus einander überlagernden elliptischen Kegelumläufen mit unterschiedlichen Frequenzen zusammen. Die Umläufe können, wie im Falle des gebräuchlichen Nutationsmodells, diskret voneinander abgegrenzte Frequenzen haben, oder sie können, etwa als Ergebnis einer Fourier- oder Wavelet-Transformation, ein gewisses Frequenzband kontinuierlich überdecken.

Jedem einzelnen Kegelumlauf des Rotationsvektors entspricht eine Bewegung des Poles entlang einer Ellipsenbahn auf der Richtungskugel oder ihrer Tangentialebenen. Da, abgesehen von der Lunisolarpräzession, die Ausdehnung dieser Ellipse nicht mehr als wenige Bogensekunden beträgt, kann das Flächenstück der Richtungskugel, auf dem der Pol sich bewegt, mit ausreichender Genauigkeit als eben betrachtet werden.

Ein anderes Beispiel eines elliptischen Kegelumlaufts einer Achse ist die Schwingung eines in einem Punkt aufgehängten Pendels.

2 Einfache Parametrisierungen

Ein einzelner elliptischer Umlauf eines Punktes in einer Ebenen, entsprechend den oben genannten Beispielen, kann in rechtshändigen cartesischen Koordinaten beschrieben werden durch

$$\begin{aligned}x &= \alpha \cos(\omega t + \kappa), \\y &= \beta \sin(\omega t + \lambda).\end{aligned}\tag{1}$$

Dabei liegt der Ursprung des Koordinatensystems im Zentrum der Ellipse. ω ist die mit dem Faktor 2π multiplizierte Frequenz des Umlaufs. Die Amplituden α, β und die Phasenwinkel κ, λ sind vier konstante Koeffizienten, die die Punktbewegung mit der Frequenz ω beschreiben. ω und die vier Koeffizienten sind reelle Zahlen mit den einzigen Einschränkungen, dass ω von null verschieden ist und dass α und β nicht beide gleich null sind. Sie können positiv oder negativ sein.

Es sollen im folgenden zunächst verschiedene Sonderfälle einer solchen periodischen Bewegung betrachtet werden.

Der Sonderfall der *Kreisbewegung* ist charakterisiert durch die Bedingungen $\alpha = \beta$, für das hier r gesetzt wird, und $\kappa = \lambda$, für das hier φ gesetzt wird:

$$\begin{aligned}x &= r \cos(\omega t + \varphi), \\y &= r \sin(\omega t + \varphi).\end{aligned}\tag{2}$$

r ist der Radius des Kreises, und φ ist der Phasenwinkel, der die Richtung des Ortsvektors zum Zeitpunkt $t = 0$ angibt. Der Umlaufsinn ist, unabhängig vom Vorzeichen von r , für $\omega > 0$ positiv (entgegen dem Uhrzeigersinn) und für $\omega < 0$ negativ (im Uhrzeigersinn). Eine Vorzeichenumkehrung von r bei gleichzeitiger Änderung des Phasenwinkels φ um π lässt die durch (2) beschriebene Bewegung invariant. Es gibt daher für jede Kreisbewegung zwei verschiedene Parametrisierungen des Typs (2).

Eine Alternativformulierung zu (2) ergibt die Auflösung des Argumentes $\omega t + \varphi$ mit Hilfe der trigonometrischen Additionstheoreme:

$$\begin{aligned}x &= a \cos(\omega t) - b \sin(\omega t), \\y &= a \sin(\omega t) + b \cos(\omega t),\end{aligned}\tag{3}$$

worin die zwei Koeffizienten statt r, φ jetzt a, b sind:

$$a = r \cos \varphi, \quad b = r \sin \varphi.\tag{4}$$

Die umgekehrte Transformation der Koeffizienten lautet

$$r^2 = a^2 + b^2, \quad \tan \varphi = \frac{b}{a}.\tag{5}$$

Für φ stehen zwei Möglichkeiten in gegenüberliegenden Quadranten zur Wahl, wodurch das Vorzeichen von r festgelegt wird. Falls $\operatorname{sgn} a = \operatorname{sgn} b$ ist, gilt: Wenn φ im ersten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn} r = \operatorname{sgn} a = \operatorname{sgn} b$; wenn φ im dritten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn} r \neq \operatorname{sgn} a = \operatorname{sgn} b$. Falls $\operatorname{sgn} a \neq \operatorname{sgn} b$ ist, gilt: Wenn φ im zweiten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn} r = \operatorname{sgn} b \neq \operatorname{sgn} a$; wenn φ vierten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn} r = \operatorname{sgn} a \neq \operatorname{sgn} b$.

r, φ sind die Polarkoordinaten und a, b die cartesischen oder Orthogonalkoordinaten des Punktes zum Zeitpunkt $t = 0$. Dementsprechend sei die Darstellung (2) mit den Koeffizienten r, φ *polar* und die Darstellung (3) mit den Koeffizienten a, b *orthogonal* genannt. Auch in der orthogonalen Darstellung (3) ist der Umlaufsinn der Kreisbewegung nicht von den Vorzeichen der Koeffizienten a, b , sondern allein vom Vorzeichen von ω abhängig.

Die Terme in (3) mit dem Koeffizienten a werden als „in Phase“ (engl. *in phase*) und die Terme mit dem Koeffizienten b werden als „ausser Phase“ (engl. *out of phase*) bezeichnet. Wenn der Ursprung der Zeitskala so gewählt wird, dass der Phasenwinkel φ gleich 0 oder π ist, bleiben in der orthogonalen Darstellung (3) wegen $b = 0$ nur die In-Phase-Terme. Dann fallen mit $\varphi = 0, \pi$ und $a = \pm r$ die orthogonale und die polare Darstellung zusammen. Die Ausser-Phase-Terme allein beschreiben einen Kreisumlauf, der gegenüber dem der In-Phase-Terme um $\pm 90^\circ$ verdreht oder zeitlich um $\pm \pi/2 \omega$ verschoben ist.

Der allgemeinere Sonderfall der *Ellipsenbewegung in Hauptachsenlage* ergibt sich aus der generellen Bewegung (1) durch die alleinige Bedingung $\kappa = \lambda$, für das hier φ gesetzt wird. Sie lautet in der *polaren Darstellung*

$$\begin{aligned}x &= \alpha \cos(\omega t + \varphi), \\y &= \beta \sin(\omega t + \varphi).\end{aligned}\tag{6}$$

Während die Kreisbewegung durch zwei Koeffizienten parametrisiert war, werden jetzt drei Koeffizienten benötigt. In der polaren Darstellung (6) ist α gleich der Ellipsenhalbachse A in Richtung der x -Achse, β gleich der Ellipsenhalbachse B in Richtung der y -Achse und φ der Phasenwinkel, der

indirekt (analog zur „reduzierten Breite“ in der ellipsoidischen Trigonometrie) die Richtung des Ortsvektors zum Zeitpunkt $t = 0$ angibt. Der Umlaufsinn ist, wenn $\omega > 0$ ist, für $\operatorname{sgn} \alpha = \operatorname{sgn} \beta$ positiv und für $\operatorname{sgn} \alpha \neq \operatorname{sgn} \beta$ negativ; für $\omega < 0$ ist es umgekehrt. Eine Vorzeichenumkehrung von α und β bei gleichzeitiger Änderung des Phasenwinkels φ um π lässt die durch (6) beschriebene Bewegung invariant. Es gibt daher für jede Ellipsenbewegung in Hauptachsenlage zwei verschiedene Parametrisierungen des Typs (6).

Durch Einsetzen der Halbachsen A, B erhält man die wegen

$$A = \alpha, \quad B = \beta \quad (7)$$

mit der polaren Darstellung (6) übereinstimmende *axiale Darstellung*

$$\begin{aligned} x &= A \cos(\omega t + \varphi), \\ y &= B \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (8)$$

mit den drei Koeffizienten A, B, φ . A und B können positiv oder negativ sein. Wegen der Übereinstimmung mit der polaren Darstellung besteht hier die gleiche Zweideutigkeit wie dort.

Als Alternativformulierung ergibt sich durch Auflösung des Argumentes $\omega t + \varphi$ die *orthogonale Darstellung*

$$\begin{aligned} x &= a \cos(\omega t) - b \sin(\omega t), \\ y &= c \sin(\omega t) + d \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (9)$$

mit den Koeffizienten

$$\begin{aligned} a &= \alpha \cos \varphi = A \cos \varphi, & b &= \alpha \sin \varphi = A \sin \varphi, \\ c &= \beta \cos \varphi = B \cos \varphi, & d &= \beta \sin \varphi = B \sin \varphi. \end{aligned} \quad (10)$$

Diese vier orthogonalen Koeffizienten sind eindeutig. Zwischen ihnen besteht die Beziehung

$$ad = bc, \quad (11)$$

so dass nur drei von ihnen unabhängig sind. Insbesondere haben, falls a und b das gleiche Vorzeichen haben, auch c und d das gleiche Vorzeichen und umgekehrt. Die Umkehrung der Koeffiziententransformation (10) lautet

$$\begin{aligned} \alpha^2 &= A^2 = a^2 + b^2, & \beta^2 &= B^2 = c^2 + d^2, \\ \tan \varphi &= \frac{b}{a} = \frac{d}{c}. \end{aligned} \quad (12)$$

Für φ stehen zwei Möglichkeiten in gegenüberliegenden Quadranten zur Wahl, wodurch die Vorzeichen von α und β festgelegt werden. Falls $\operatorname{sgn} a = \operatorname{sgn} b$ und $\operatorname{sgn} c = \operatorname{sgn} d$ ist, gilt: Wenn φ im ersten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn} \alpha = \operatorname{sgn} a = \operatorname{sgn} b$ und $\operatorname{sgn} \beta = \operatorname{sgn} c = \operatorname{sgn} d$; wenn φ im dritten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn} \alpha \neq \operatorname{sgn} a = \operatorname{sgn} b$ und $\operatorname{sgn} \beta \neq \operatorname{sgn} c = \operatorname{sgn} d$. Falls $\operatorname{sgn} a \neq \operatorname{sgn} b$ und $\operatorname{sgn} c \neq \operatorname{sgn} d$ ist, gilt: Wenn φ im zweiten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn} \alpha = \operatorname{sgn} b \neq \operatorname{sgn} a$ und $\operatorname{sgn} \beta = \operatorname{sgn} d \neq \operatorname{sgn} c$; wenn φ im vierten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn} \alpha = \operatorname{sgn} a \neq \operatorname{sgn} b$ und $\operatorname{sgn} \beta = \operatorname{sgn} c \neq \operatorname{sgn} d$.

Die *allgemeine Ellipsenbewegung*, bei der die Symmetrieachsen der Ellipse nicht die Richtungen der Koordinatenachsen haben müssen, ist in *polarer Darstellung* durch (1) ohne weitere Restriktionen gegeben:

$$\begin{aligned} x &= \alpha \cos(\omega t + \kappa), \\ y &= \beta \sin(\omega t + \lambda) \end{aligned} \quad (13)$$

mit den vier Koeffizienten $\alpha, \beta, \kappa, \lambda$. Eine Vorzeichenumkehrung von α bei gleichzeitiger Änderung von κ um π oder eine Vorzeichenumkehrung von β bei gleichzeitiger Änderung von λ um π lässt die durch (13) beschriebene Bewegung invariant. Es gibt daher für jede allgemeine Ellipsenbewegung vier verschiedene Parametrisierungen des polaren Typs (13).

Die *orthogonale Darstellung* folgt durch Auflösung der Argumente $\omega t + \kappa$ und $\omega t + \lambda$ zu

$$\begin{aligned} x &= a \cos(\omega t) - b \sin(\omega t), \\ y &= c \sin(\omega t) + d \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (14)$$

mit den vier unabhängigen Koeffizienten

$$\begin{aligned} a &= \alpha \cos \kappa, & b &= \alpha \sin \kappa, \\ c &= \beta \cos \lambda, & d &= \beta \sin \lambda. \end{aligned} \quad (15)$$

Diese vier orthogonalen Koeffizienten sind eindeutig. Die Umkehrung der Koeffiziententransformation (15) lautet

$$\begin{aligned} \alpha^2 &= a^2 + b^2, & \beta^2 &= c^2 + d^2, \\ \tan \kappa &= \frac{b}{a}, & \tan \lambda &= \frac{d}{c}. \end{aligned} \quad (16)$$

Für κ und λ stehen je zwei Möglichkeiten in gegenüberliegenden Quadranten zur Wahl, wodurch die Vorzeichen von α und β festgelegt werden. Falls $\operatorname{sgn} a = \operatorname{sgn} b$ ist, gilt: Wenn κ im ersten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn} \alpha = \operatorname{sgn} a = \operatorname{sgn} b$; wenn κ im dritten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn} \alpha \neq \operatorname{sgn} a = \operatorname{sgn} b$. Falls $\operatorname{sgn} a \neq \operatorname{sgn} b$ ist, gilt: Wenn κ im zweiten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn} \alpha = \operatorname{sgn} b \neq \operatorname{sgn} a$; wenn κ im vierten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn} \alpha = \operatorname{sgn} a \neq \operatorname{sgn} b$. Falls $\operatorname{sgn} c = \operatorname{sgn} d$ ist, gilt: Wenn λ im ersten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn} \beta = \operatorname{sgn} c = \operatorname{sgn} d$; wenn λ im dritten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn} \beta \neq \operatorname{sgn} c = \operatorname{sgn} d$. Falls $\operatorname{sgn} c \neq \operatorname{sgn} d$ ist, gilt: Wenn λ im zweiten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn} \beta = \operatorname{sgn} d \neq \operatorname{sgn} c$; wenn λ im vierten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn} \beta = \operatorname{sgn} c \neq \operatorname{sgn} d$.

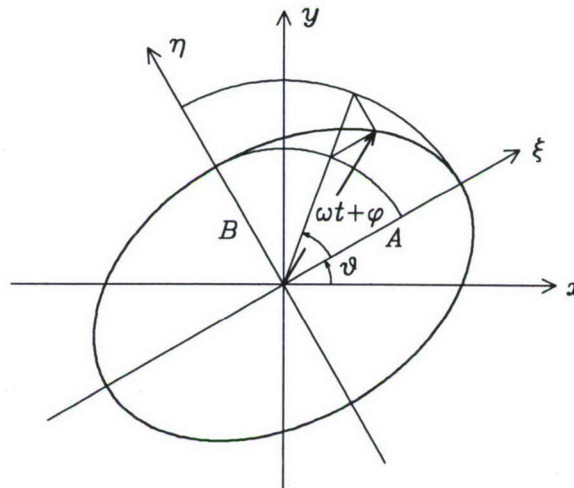


Abb. 1: Bahnellipse in allgemeiner Lage

Dass die Punktbewegung gemäss (13) oder (14) tatsächlich eine allgemeine Ellipsenbewegung ist, lässt sich zeigen, indem man die Ellipsenbahn in Hauptachsenlage (8), wie in der Abbildung 1 gezeigt, um einen gewissen Winkel ϑ dreht:

$$\begin{aligned} \xi &= A \cos(\omega t + \varphi), \\ \eta &= B \sin(\omega t + \varphi), \\ x &= \xi \cos \vartheta - \eta \sin \vartheta = A \cos \vartheta \cos(\omega t + \varphi) - B \sin \vartheta \sin(\omega t + \varphi), \\ y &= \xi \sin \vartheta + \eta \cos \vartheta = A \sin \vartheta \cos(\omega t + \varphi) + B \cos \vartheta \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned} \quad (17)$$

Die vier Koeffizienten in dieser *axialen Darstellung* sind die zwei Halbachsen A, B , der Phasenwinkel φ , der indirekt die Richtung des Ortsvektors zum Zeitpunkt $t = 0$ in bezug auf die ξ -Achse, in der die Ellipsenhalbachse A liegt, angibt, und der die Orientierung der Ellipse beschreibende Winkel ϑ

zwischen der x -Achse und der ξ -Achse. Eine Vertauschung der Parameter A, B bei gleichzeitiger Vergrößerung von ϑ um $\pi/2$ und Verkleinerung von φ um $\pi/2$ lässt die durch (17) beschriebene Bewegung invariant. Eine solche Änderung führt erst nach viermaliger Ausführung wieder zur Ausgangsdarstellung. Überdies ist, ähnlich wie in den oben betrachteten Sonderfällen, eine Vorzeichenumkehrung von A und B bei gleichzeitiger Änderung von φ um π möglich. Somit ergeben sich für jede allgemeine Ellipsenbewegung insgesamt acht verschiedene Parametrisierungen des axialen Typs (17). Dies entspricht den vier Möglichkeiten für die Wahl der ξ -Achse als einer der vier Ellipsenhalbachsen, wozu die generelle Zwei-Vorzeichen-Wahl für die Achslängen A, B kommt.

Die axiale Darstellung (17) lässt sich, ähnlich wie die polare Darstellung, durch Auflösung des Argumentes $\omega t + \varphi$ in die orthogonale Darstellung (14) überführen:

$$\begin{aligned} x &= a \cos(\omega t) - b \sin(\omega t), \\ y &= c \sin(\omega t) + d \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (18)$$

mit den vier unabhängigen Koeffizienten

$$\begin{aligned} a &= A \cos \vartheta \cos \varphi - B \sin \vartheta \sin \varphi, & b &= A \cos \vartheta \sin \varphi + B \sin \vartheta \cos \varphi, \\ c &= -A \sin \vartheta \sin \varphi + B \cos \vartheta \cos \varphi, & d &= A \sin \vartheta \cos \varphi + B \cos \vartheta \sin \varphi. \end{aligned} \quad (19)$$

Für die umgekehrte Koeffiziententransformation erhält man aus den Zusammenfassungen

$$\begin{aligned} a + c &= (A + B) (\cos \vartheta \cos \varphi - \sin \vartheta \sin \varphi) = (A + B) \cos(\vartheta + \varphi), \\ a - c &= (A - B) (\cos \vartheta \cos \varphi + \sin \vartheta \sin \varphi) = (A - B) \cos(\vartheta - \varphi), \\ d + b &= (A + B) (\sin \vartheta \cos \varphi + \cos \vartheta \sin \varphi) = (A + B) \sin(\vartheta + \varphi), \\ d - b &= (A - B) (\sin \vartheta \cos \varphi - \cos \vartheta \sin \varphi) = (A - B) \sin(\vartheta - \varphi) \end{aligned}$$

die Beziehungen

$$\begin{aligned} (A + B)^2 &= (a + c)^2 + (d + b)^2, & (A - B)^2 &= (a - c)^2 + (d - b)^2, \\ \tan(\vartheta + \varphi) &= \frac{d + b}{a + c}, & \tan(\vartheta - \varphi) &= \frac{d - b}{a - c}. \end{aligned} \quad (20)$$

Für $\vartheta + \varphi$ und $\vartheta - \varphi$ stehen je zwei Möglichkeiten in gegenüberliegenden Quadranten zur Wahl. Daraus ergeben sich insgesamt acht Möglichkeiten für ϑ und φ , wodurch die Vorzeichen von $A + B$ und $A - B$ festgelegt werden. Falls $\operatorname{sgn}(a + c) = \operatorname{sgn}(d + b)$ ist, gilt: Wenn $\vartheta + \varphi$ im ersten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn}(A + B) = \operatorname{sgn}(a + c) = \operatorname{sgn}(d + b)$; wenn $\vartheta + \varphi$ im dritten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn}(A + B) \neq \operatorname{sgn}(a + c) = \operatorname{sgn}(d + b)$. Falls $\operatorname{sgn}(a + c) \neq \operatorname{sgn}(d + b)$ ist, gilt: Wenn $\vartheta + \varphi$ im zweiten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn}(A + B) = \operatorname{sgn}(d + b) \neq \operatorname{sgn}(a + c)$; wenn $\vartheta + \varphi$ im vierten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn}(A + B) = \operatorname{sgn}(a + c) \neq \operatorname{sgn}(d + b)$. Falls $\operatorname{sgn}(a - c) = \operatorname{sgn}(d - b)$ ist, gilt: Wenn $\vartheta - \varphi$ im ersten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn}(A - B) = \operatorname{sgn}(a - c) = \operatorname{sgn}(d - b)$; wenn $\vartheta - \varphi$ im dritten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn}(A - B) \neq \operatorname{sgn}(a - c) = \operatorname{sgn}(d - b)$. Falls $\operatorname{sgn}(a - c) \neq \operatorname{sgn}(d - b)$ ist, gilt: Wenn $\vartheta - \varphi$ im zweiten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn}(A - B) = \operatorname{sgn}(d - b) \neq \operatorname{sgn}(a - c)$; wenn $\vartheta - \varphi$ im vierten Quadranten gewählt wird, ist $\operatorname{sgn}(A - B) = \operatorname{sgn}(a - c) \neq \operatorname{sgn}(d - b)$. Dann liegen mit $A + B$ und $A - B$ auch A und B fest.

Der oben betrachtete Sonderfall der Ellipsenbewegung in Hauptachsenlage war in der polaren Darstellung (1) durch gleiche Phasenwinkel κ, λ charakterisiert. Beim weitergehenden Sonderfall der Kreisbewegung waren überdies die Amplituden α, β gleich.

Es fehlt noch die Betrachtung des Sonderfalles, in dem nicht die Phasenwinkel κ, λ , sondern die Amplituden α, β einander gleich sind. Seine *polare Darstellung* lautet

$$\begin{aligned} x &= r \cos(\omega t + \kappa), \\ y &= r \sin(\omega t + \lambda) \end{aligned} \quad (21)$$

mit den drei Koeffizienten r, κ, λ .

Die *orthogonale Darstellung* folgt durch Auflösung der Argumente $\omega t + \kappa$ und $\omega t + \lambda$ zu

$$\begin{aligned} x &= a \cos(\omega t) - b \sin(\omega t), \\ y &= c \sin(\omega t) + d \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (22)$$

mit den vier Koeffizienten

$$\begin{aligned} a &= r \cos \kappa, & b &= r \sin \kappa, \\ c &= r \cos \lambda, & d &= r \sin \lambda. \end{aligned} \quad (23)$$

Zwischen ihnen besteht die Bedingung

$$a^2 + b^2 = c^2 + d^2, \quad (24)$$

so dass nur drei von ihnen unabhängig sind. Die Umkehrung der Koeffiziententransformation (23) lautet

$$\begin{aligned} r^2 &= a^2 + b^2 = c^2 + d^2, \\ \tan \kappa &= \frac{b}{a}, & \tan \lambda &= \frac{d}{c}. \end{aligned} \quad (25)$$

Die durch (21) oder (22) beschriebene Punktbewegung ist eine *Ellipsenbewegung in Diagonallage*. Um dies zu zeigen, sind, ähnlich wie in der Abbildung 1, die Koordinatenachsen um 45° gegen den Uhrzeigersinn zu drehen. Die dadurch sich ergebenden Koordinaten ξ, η folgen aus (21) zu

$$\begin{aligned} \xi &= x \cos \frac{\pi}{4} + y \sin \frac{\pi}{4} = \sqrt{\frac{1}{2}} r \{ \cos(\omega t + \kappa) + \sin(\omega t + \lambda) \}, \\ \eta &= -x \sin \frac{\pi}{4} + y \cos \frac{\pi}{4} = \sqrt{\frac{1}{2}} r \{ -\cos(\omega t + \kappa) + \sin(\omega t + \lambda) \}. \end{aligned}$$

Mit der Substitution

$$\kappa = \varphi + \sigma, \quad \lambda = \varphi - \sigma + \frac{\pi}{2} \quad (26)$$

bzw.

$$\varphi = \frac{\kappa + \lambda}{2} - \frac{\pi}{4}, \quad \sigma = \frac{\kappa - \lambda}{2} + \frac{\pi}{4}$$

folgt weiter

$$\begin{aligned} \xi &= \sqrt{\frac{1}{2}} r \{ \cos(\omega t + \varphi + \sigma) + \cos(\omega t + \varphi - \sigma) \} = \sqrt{2} r \cos \sigma \cos(\omega t + \varphi), \\ \eta &= \sqrt{\frac{1}{2}} r \{ -\cos(\omega t + \varphi + \sigma) + \cos(\omega t + \varphi - \sigma) \} = \sqrt{2} r \sin \sigma \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned}$$

Mit der weiteren Substitution

$$A = \sqrt{2} r \cos \sigma, \quad B = \sqrt{2} r \sin \sigma \quad (27)$$

folgt schliesslich die bekannte Ellipsenbewegung in Hauptachsenlage

$$\begin{aligned} \xi &= A \cos(\omega t + \varphi), \\ \eta &= B \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned} \quad (28)$$

Der Parameter $\sigma = \frac{\kappa - \lambda}{2} + \frac{\pi}{4}$ steuert die Elliptizität. Für $\kappa = \lambda$, $\sigma = \frac{\pi}{4}$ wird $A = B = r$ (Sonderfall des Kreisumlaufs).

Die Rücktransformation von (28) in die ursprünglichen Koordinaten x, y ergibt die *axiale Darstellung* der Ellipsenbewegung in Diagonallage:

$$\begin{aligned} x &= \xi \cos \frac{\pi}{4} - \eta \sin \frac{\pi}{4} = \sqrt{\frac{1}{2}} A \cos(\omega t + \varphi) - \sqrt{\frac{1}{2}} B \sin(\omega t + \varphi), \\ y &= \xi \sin \frac{\pi}{4} + \eta \cos \frac{\pi}{4} = \sqrt{\frac{1}{2}} A \cos(\omega t + \varphi) + \sqrt{\frac{1}{2}} B \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned} \quad (29)$$

Dies folgt auch als Sonderfall der axialen Darstellung (17) der allgemeinen Ellipsenbewegung mit $\vartheta = 45^\circ$.

Die Auflösung des Argumentes $\omega t + \varphi$ führt zur orthogonalen Darstellung (22):

$$\begin{aligned} x &= a \cos(\omega t) - b \sin(\omega t), \\ y &= c \sin(\omega t) + d \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (30)$$

mit den vier Koeffizienten

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{\frac{1}{2}} (A \cos \varphi - B \sin \varphi), & b &= \sqrt{\frac{1}{2}} (A \sin \varphi + B \cos \varphi), \\ c &= \sqrt{\frac{1}{2}} (-A \sin \varphi + B \cos \varphi), & d &= \sqrt{\frac{1}{2}} (A \cos \varphi + B \sin \varphi). \end{aligned} \quad (31)$$

Für die umgekehrte Koeffiziententransformation erhält man aus den Zusammenfassungen

$$\begin{aligned} a+c &= \sqrt{\frac{1}{2}} (A+B) (\cos \varphi - \sin \varphi), & d+b &= \sqrt{\frac{1}{2}} (A+B) (\cos \varphi + \sin \varphi), \\ a-c &= \sqrt{\frac{1}{2}} (A-B) (\cos \varphi + \sin \varphi), & d-b &= \sqrt{\frac{1}{2}} (A-B) (\cos \varphi - \sin \varphi) \end{aligned}$$

die Beziehungen

$$\begin{aligned} (A+B)^2 &= (a+c)^2 + (d+b)^2, & (A-B)^2 &= (a-c)^2 + (d-b)^2, \\ \frac{\cos \varphi - \sin \varphi}{\cos \varphi + \sin \varphi} &= \frac{a+c}{d+b} = \frac{d-b}{a-c} \Rightarrow \tan \varphi = \frac{(d+b) - (a+c)}{(d+b) + (a+c)} = \frac{(a-c) - (d-b)}{(a-c) + (d-b)} \end{aligned} \quad (32)$$

Auf die Mehrdeutigkeiten der polaren und der axialen Darstellung soll hier nicht weiter eingegangen werden.

Der in der polaren Darstellung (21) auftretende Parameter r , für den gemäss (27)

$$r = \sqrt{\frac{1}{2} (A^2 + B^2)} \quad (33)$$

gilt, ist nach (21) gleich dem grössten Betrag, den die Koordinaten x, y annehmen.

Eine Zusammenstellung der unterschiedlichen Darstellungen der allgemeinen Ellipsenbewegung und ihrer Sonderfälle gibt die Tabelle 1.

	polar	orthogonal	axial
Kreis:			
$x = r \cos(\omega t + \varphi)$	$= a \cos(\omega t) - b \sin(\omega t)$		
$y = r \sin(\omega t + \varphi)$	$= a \sin(\omega t) + b \cos(\omega t)$		
Ellipse in Hauptachsenlage:			
$x = \alpha \cos(\omega t + \varphi)$	$= a \cos(\omega t) - b \sin(\omega t)$	$= A \cos(\omega t + \varphi)$	
$y = \beta \sin(\omega t + \varphi)$	$= c \sin(\omega t) + d \cos(\omega t)$	$= B \sin(\omega t + \varphi)$	
(Bedingung: $ad = bc$)			
Ellipse in Diagonallage:			
$x = r \cos(\omega t + \kappa)$	$= a \cos(\omega t) - b \sin(\omega t)$	$= \sqrt{1/2} A \cos(\omega t + \varphi) - \sqrt{1/2} B \sin(\omega t + \varphi)$	
$y = r \sin(\omega t + \lambda)$	$= c \sin(\omega t) + d \cos(\omega t)$	$= \sqrt{1/2} A \cos(\omega t + \varphi) + \sqrt{1/2} B \sin(\omega t + \varphi)$	
(Bed.: $a^2 + b^2 = c^2 + d^2$)			
Ellipse in allgemeiner Lage:			
$x = \alpha \cos(\omega t + \kappa)$	$= a \cos(\omega t) - b \sin(\omega t)$	$= A \cos \vartheta \cos(\omega t + \varphi) - B \sin \vartheta \sin(\omega t + \varphi)$	
$y = \beta \sin(\omega t + \lambda)$	$= c \sin(\omega t) + d \cos(\omega t)$	$= A \sin \vartheta \cos(\omega t + \varphi) + B \cos \vartheta \sin(\omega t + \varphi)$	

Tab. 1: Einfache Parametrisierungen

3 Zusammengesetzte Parametrisierungen

Ausgehend von der orthogonalen Darstellung (14, 18) der *allgemeinen Ellipsenbewegung*, sollen nun die Koeffizienten folgendermassen zerlegt werden:

$$\begin{aligned} a &= a_+ + a_-, & b &= b_+ - b_-, \\ c &= a_+ - a_-, & d &= b_+ + b_-. \end{aligned} \quad (34)$$

Dem entspricht als Umkehrung die Substitution

$$\begin{aligned} a_+ &= \frac{1}{2}(a+c), & a_- &= \frac{1}{2}(a-c), \\ b_+ &= \frac{1}{2}(d+b), & b_- &= \frac{1}{2}(d-b). \end{aligned} \quad (35)$$

Dies führt zu der Zerlegung

$$\begin{aligned} x &= x_+ + x_-, \\ y &= y_+ + y_- \end{aligned} \quad (36)$$

der allgemeinen Ellipsenbewegung in eine mit dem Symbol „+“ bezeichnete *prograde Komponente* und eine mit dem Symbol „-“ bezeichnete *retrograde Komponente*. Man erhält mit (34) die beiden Komponenten in orthogonaler Darstellung:

$$\begin{aligned} x_+ &= a_+ \cos(\omega t) - b_+ \sin(\omega t), & x_- &= a_- \cos(-\omega t) - b_- \sin(-\omega t), \\ y_+ &= a_+ \sin(\omega t) + b_+ \cos(\omega t), & y_- &= a_- \sin(-\omega t) + b_- \cos(-\omega t). \end{aligned} \quad (37)$$

Ein Vergleich mit der orthogonalen Darstellung (3) der Kreisbewegung zeigt: Die prograde Komponente der allgemeinen Ellipsenbewegung ist eine Kreisbewegung, deren Umlaufsinn dem Vorzeichen von ω entspricht. Ihre orthogonalen Koeffizienten sind a_+, b_+ . Die retrograde Komponente der allgemeinen Ellipsenbewegung ist eine Kreisbewegung, deren Umlaufsinn dem Vorzeichen von ω entgegengesetzt ist. Ihre orthogonalen Koeffizienten sind a_-, b_- .

Die polare Darstellung der beiden Kreisbewegungen erhält man, wenn man von der axialen Darstellung (17) ausgeht. Die Zerlegung der Koeffizienten ist dann

$$A = r_+ + r_-, \quad B = r_+ - r_- \quad (38)$$

oder umgekehrt

$$r_+ = \frac{1}{2}(A+B), \quad r_- = \frac{1}{2}(A-B). \quad (39)$$

Dies ergibt die beiden Komponenten in polarer Darstellung

$$\begin{aligned} x_+ &= r_+ \cos(\omega t + \varphi + \vartheta), & x_- &= r_- \cos(-\omega t - \varphi + \vartheta), \\ y_+ &= r_+ \sin(\omega t + \varphi + \vartheta), & y_- &= r_- \sin(-\omega t - \varphi + \vartheta). \end{aligned} \quad (40)$$

Ein Vergleich mit der polaren Darstellung (2) der Kreisbewegung zeigt: Die prograde Komponente der allgemeinen Ellipsenbewegung ist eine Kreisbewegung, deren Umlaufsinn dem Vorzeichen von ω entspricht. Ihr Radius ist r_+ , und ihr Phasenwinkel ist $\vartheta + \varphi$. Die retrograde Komponente der allgemeinen Ellipsenbewegung ist eine Kreisbewegung, deren Umlaufsinn dem Vorzeichen von ω entgegengesetzt ist. Ihr Radius ist r_- , und ihr Phasenwinkel ist $\vartheta - \varphi$.

Zwischen den orthogonalen und den polaren Koeffizienten der beiden Kreisbewegungen bestehen entsprechend (4) und (5) die Beziehungen

$$\begin{aligned} a_+ &= r_+ \cos(\vartheta + \varphi), & a_- &= r_- \cos(\vartheta - \varphi), \\ b_+ &= r_+ \sin(\vartheta + \varphi), & b_- &= r_- \sin(\vartheta - \varphi) \end{aligned} \quad (41)$$

und

$$\begin{aligned} r_+^2 &= a_+^2 + b_+^2, & r_-^2 &= a_-^2 + b_-^2, \\ \tan(\vartheta + \varphi) &= \frac{b_+}{a_+}, & \tan(\vartheta - \varphi) &= \frac{b_-}{a_-}. \end{aligned} \quad (42)$$

Wenn die Ellipsenbewegung ursprünglich in axialer Form gegeben war, liegen die Quadranten von $\vartheta + \varphi$ und $\vartheta - \varphi$ fest, und die Vorzeichen von r_+ und r_- sind durch (39) bestimmt. Anderenfalls besteht sowohl für den prograden als auch für den retrograden Kreisumlauf die oben beschriebene Zweideutigkeit der polaren Parametrisierung.

Im Sonderfall der *Ellipsenbewegung in Hauptachsenlage* unterscheidet sich die orthogonale Darstellung (9) formal nicht von der der allgemeinen Ellipsenbewegung (14). Folglich bleibt ihre Zerlegung (37) unverändert bestehen:

$$\begin{aligned} x_+ &= a_+ \cos(\omega t) - b_+ \sin(\omega t), & x_- &= a_- \cos(-\omega t) - b_- \sin(-\omega t), \\ y_+ &= a_+ \sin(\omega t) + b_+ \cos(\omega t), & y_- &= a_- \sin(-\omega t) + b_- \cos(-\omega t) \end{aligned} \quad (43)$$

mit den Koeffizienten a_+, a_-, b_+, b_- gemäss (35). Aus der zwischen den orthogonalen Koeffizienten a, b, c, d bestehenden Bedingung (11) folgt durch Einsetzen in (34) als Bedingung zwischen den Koeffizienten a_+, a_-, b_+, b_-

$$a_+ b_- + a_- b_+ = 0. \quad (44)$$

Die polare Darstellung vereinfacht sich gegenüber (40) mit $\vartheta = 0$ zu

$$\begin{aligned} x_+ &= r_+ \cos(\omega t + \varphi), & x_- &= r_- \cos(-\omega t - \varphi), \\ y_+ &= r_+ \sin(\omega t + \varphi), & y_- &= r_- \sin(-\omega t - \varphi) \end{aligned} \quad (45)$$

mit den Koeffizienten $r_+ = \frac{1}{2}(A+B)$, $r_- = \frac{1}{2}(A-B)$ (39) und φ . Ebenso vereinfachen sich die Beziehungen zwischen den orthogonalen und den polaren Koeffizienten zu

$$\begin{aligned} a_+ &= r_+ \cos \varphi, & a_- &= r_- \cos \varphi, \\ b_+ &= r_+ \sin \varphi, & b_- &= -r_- \sin \varphi \end{aligned} \quad (46)$$

und

$$\begin{aligned} r_+^2 &= a_+^2 + b_+^2, & r_-^2 &= a_-^2 + b_-^2, \\ \tan \varphi &= \frac{b_+}{a_+} = \frac{-b_-}{a_-}. \end{aligned} \quad (47)$$

Beim weitergehenden Sonderfall der *Kreisbewegung* folgt mit $A = B = r$

$$r_+ = r, \quad r_- = 0. \quad (48)$$

Sie ist also mit ihrer prograden Komponente identisch, während ihre retrograde Komponente verschwindet.

Im entgegengesetzten Sonderfall, in dem eine der Hauptachsen der Ellipse, etwa B , gleich 0 ist, entartet die Ellipsenbewegung zu einer *Schwingung auf einer Geraden*. Dann ist

$$r_+ = r_- = \frac{A}{2}; \quad (49)$$

d.h. die prograde und die retrograde Kreisbewegung haben gleiche Radien.

	polar		orthogonal	
Kreis	x_+	$= r_+ \cos(\omega t + \varphi)$	$=$	$a_+ \cos(\omega t) - b_+ \sin(\omega t)$
	y_+	$= r_+ \sin(\omega t + \varphi)$	$=$	$a_+ \sin(\omega t) + b_+ \cos(\omega t)$
	x_-	$= 0$	$=$	0
	y_-	$= 0$	$=$	0
Ellipse in Hauptachsenlage	x_+	$= r_+ \cos(\omega t + \varphi)$	$=$	$a_+ \cos(\omega t) - b_+ \sin(\omega t)$
	y_+	$= r_+ \sin(\omega t + \varphi)$	$=$	$a_+ \sin(\omega t) + b_+ \cos(\omega t)$
	x_-	$= r_- \cos(-\omega t - \varphi)$	$=$	$a_- \cos(-\omega t) - b_- \sin(-\omega t)$
	y_-	$= r_- \sin(-\omega t - \varphi)$	$=$	$a_- \sin(-\omega t) + b_- \cos(-\omega t)$ (Bed.: $a_+ b_- + a_- b_+ = 0$)
Ellipse in allgemeiner Lage	x_+	$= r_+ \cos(\omega t + \varphi + \vartheta)$	$=$	$a_+ \cos(\omega t) - b_+ \sin(\omega t)$
	y_+	$= r_+ \sin(\omega t + \varphi + \vartheta)$	$=$	$a_+ \sin(\omega t) + b_+ \cos(\omega t)$
	x_-	$= r_- \cos(-\omega t - \varphi + \vartheta)$	$=$	$a_- \cos(-\omega t) - b_- \sin(-\omega t)$
	y_-	$= r_- \sin(-\omega t - \varphi + \vartheta)$	$=$	$a_- \sin(-\omega t) + b_- \cos(-\omega t)$

Tab. 2: Zusammengesetzte Parametrisierungen

Eine Zusammenstellung der unterschiedlichen Darstellungen der aus pro- und retrograden Kreisumläufen zusammengesetzten Bewegungen gibt die Tabelle 2.

Die Zerlegung einer Ellipsenbewegung in zwei gegensinnige Kreisumläufe eignet sich in umgekehrter Schlussfolgerung zur Definition einer Ellipse: Eine Ellipse ist die Bahnkurve, die die Summe der Ortsvektoren eines auf einer prograden Kreisbahn umlaufenden und eines mit gleicher Winkelgeschwindigkeit auf einer retrograden Kreisbahn umlaufenden Punktes beschreibt. Ihre Halbachsen A, B sind gemäss (38) durch die Radien r_+, r_- der beiden Kreise bestimmt.

Dies führt zu einer wenig bekannten Methode zur Konstruktion von Ellipsen. Hierzu sei zunächst die Hauptachsenlage der Ellipse (8) angenommen:

$$\begin{aligned} x &= A \cos(\omega t + \varphi), \\ y &= B \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

mit den Halbachsen $A \geq 0, B \geq 0$. Der Nullpunkt der Zeitskala sei so gewählt, dass der Phasenwinkel φ verschwindet. Dann ist

$$\begin{aligned} x_+ &= r_+ \cos(\omega t), & x_- &= r_- \cos(-\omega t), \\ y_+ &= r_+ \sin(\omega t), & y_- &= r_- \sin(-\omega t) \end{aligned}$$

mit

$$r_+ = \frac{1}{2}(A+B), \quad r_- = \frac{1}{2}(A-B).$$

Der Punkt mit den cartesischen Koordinaten $x = x_+ + x_-$, $y = y_+ + y_-$ beschreibt dann die oben angegebene Ellipse mit den Halbachsen A, B . Eine um den Massstabsfaktor 0,5 verkleinerte Ellipse mit den Halbachsen $A' = A/2$ und $B' = B/2$ beschreibt der Punkt mit den cartesischen Koordinaten $x' = \frac{1}{2}(x_+ + x_-)$, $y' = \frac{1}{2}(y_+ + y_-)$.

Daraus ergibt sich die folgende Vorschrift: Auf zwei konzentrischen Kreisen mit den Radien $r_+ = A' + B'$, $r_- = A' - B'$ und dem gemeinsamen Mittelpunkt im Koordinatenursprung lasse man, ausgehend vom Schnittpunkt des jeweiligen Kreises mit der x -Achse, jeweils einen Punkt gegen den Uhrzeigersinn beziehungsweise im Uhrzeigersinn umlaufen, und zwar mit gleichem Betrag der Winkelgeschwindigkeit, so dass beide Punkte, nachdem sie einmal ihren Kreis durchlaufen haben, gleichzeitig wieder an ihren Ausgangspunkt gelangen. Der Mittelpunkt der Verbindungslinie zwischen diesen beiden Punkten hat die Koordinaten x', y' und beschreibt somit die oben genannte Ellipse mit den Halbachsen A', B' .

Man kann sich anschaulich vorstellen, dass die beiden Kreise durch je ein Gleis einer Spielzeugeisenbahn gebildet werden und dass auf jedem Gleis eine kleine Lokomotive in der oben angegebenen Weise fährt. Die beiden Lokomotiven seien durch ein Gummiband miteinander verbunden, das in seinem Mittelpunkt eine Markierung trägt. Die Markierung bewegt sich auf der Ellipsenbahn.

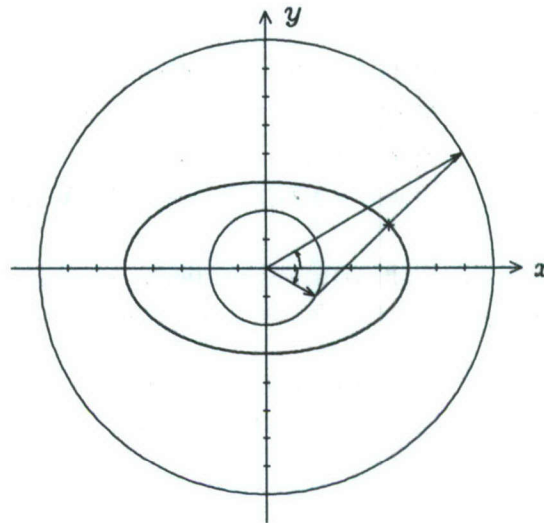


Abb. 2: Ellipsenkonstruktion mit $A' = 5$, $B' = 3$, $r_+ = A' + B' = 8$, $r_- = A' - B' = 2$

Die Abbildung 2 zeigt ein Beispiel, in dem $A' > B'$ ist, so dass beide Kreisradien r_+, r_- positiv sind. Für $A' < B'$ ist dagegen r_- negativ; d.h. der retrograd umlaufende Punkt mit den Koordinaten x_-, y_- liegt, vom Ursprung aus gesehen, immer in der entgegengesetzten Richtung, als er bei positivem r_- läge. So ergibt sich eine Ellipse, deren Halbachse B' in Richtung der y-Achse länger ist als die Halbachse A' in Richtung der x-Achse.

Wenn beide Kreisradien gleich sind, $r_+ = r_-$, haben die beiden gegensinnig umlaufenden Punkte stets gleiche Abszissen, $x_+ = x_-$, und entgegengesetzt gleiche Ordinaten, $y_+ = -y_-$. Dies ist der Fall, wenn $B' = 0$ ist; der resultierende Punkt schwingt dann auf der Abszissenachse hin und her. Wenn die Kreisradien entgegengesetzt gleich sind, $r_+ = -r_-$, haben die beiden gegensinnig umlaufenden Punkte stets gleiche Ordinaten, $y_+ = y_-$, und entgegengesetzt gleiche Abszissen, $x_+ = -x_-$. Dies ist der Fall, wenn $A' = 0$ ist; der resultierende Punkt schwingt dann auf der Ordinatenachse hin und her.

Bei der Ellipsenbewegung in allgemeiner Lage sind die Ausgangspunkte, von denen aus die beiden Punkte ihre gegensinnigen Kreisumläufe antreten, nicht die Schnittpunkte der beiden Kreise mit der x-Achse, sondern ihre Schnittpunkte mit einer anderen Achse, die mit der x-Achse den Winkel ϑ bildet. In deren Richtung hat dann die Ellipse ihre grosse oder kleine Halbachse A' .

4 Schwebungen

Bei der Überlagerung zweier Schwingungen mit etwas unterschiedlichen Frequenzen entsteht eine Schwebung: Die Amplitude nimmt rhythmisch zu und ab. Solche Schwebungen treten auch bei Punktbewegungen auf, wenn beide cartesischen Koordinaten sich aus Sinus- und Cosinus-Funktionen mit etwas unterschiedlichen Frequenzen zusammensetzen. Ein Beispiel ist die Polbewegung, die zum wesentlichen Teil aus einem Kreisumlauf mit der Chandlerschen Periode ($\approx 1,2$ Jahre) und einem jahresperiodischen Kreisumlauf besteht. Das Ergebnis ist die bekannte Radiusvariation der Kreisbahn mit einer Schwebungsperiode von rund sechs Jahren.

Ein ganz andersartiger Schwebungseffekt tritt auf, wenn eine prograde und eine retrograde Kreisbewegung Frequenzen von etwas unterschiedlichem Betrag haben. Die periodische Punktbewegung sei gegeben durch

$$\begin{aligned} x &= r_+ \cos(\omega_+ t) + r_- \cos(-\omega_- t), \\ y &= r_+ \sin(\omega_+ t) + r_- \sin(-\omega_- t), \end{aligned} \quad (50)$$

wobei der Phasenwinkel φ der Einfachheit halber gleich 0 gesetzt wurde. Mit den Substitutionen

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{\omega_+ + \omega_-}{2}, & \Delta\omega &= \frac{\omega_+ - \omega_-}{2}, \\ \omega_+ &= \omega + \Delta\omega, & \omega_- &= \omega - \Delta\omega\end{aligned}\quad (51)$$

folgt

$$\begin{aligned}x &= r_+ \cos(\omega t + \Delta\omega t) + r_- \cos(\omega t - \Delta\omega t) \\ &= (r_+ + r_-) \cos(\Delta\omega t) \cos(\omega t) - (r_+ - r_-) \sin(\Delta\omega t) \sin(\omega t), \\ y &= r_+ \sin(\omega t + \Delta\omega t) - r_- \sin(\omega t - \Delta\omega t) \\ &= (r_+ - r_-) \cos(\Delta\omega t) \sin(\omega t) + (r_+ + r_-) \sin(\Delta\omega t) \cos(\omega t).\end{aligned}\quad (52)$$

Eine anschauliche Interpretation dieser Punktbewegung liefert eine Koordinatentransformation auf ein System, das mit der Winkelgeschwindigkeit $\Delta\omega$ um den Ursprung rotiert:

$$\begin{aligned}\xi &= x \cos(\Delta\omega t) + y \sin(\Delta\omega t), \\ \eta &= -x \sin(\Delta\omega t) + y \cos(\Delta\omega t).\end{aligned}$$

Dies wird mit (52)

$$\begin{aligned}\xi &= (r_+ + r_-) \cos^2(\Delta\omega t) \cos(\omega t) - (r_+ - r_-) \sin(\Delta\omega t) \cos(\Delta\omega t) \sin(\omega t) \\ &\quad + (r_+ - r_-) \sin(\Delta\omega t) \cos(\Delta\omega t) \sin(\omega t) + (r_+ + r_-) \sin^2(\Delta\omega t) \cos(\omega t) \\ &= (r_+ + r_-) \cos(\omega t), \\ \eta &= -(r_+ + r_-) \sin(\Delta\omega t) \cos(\Delta\omega t) \cos(\omega t) + (r_+ - r_-) \sin^2(\Delta\omega t) \sin(\omega t) \\ &\quad + (r_+ - r_-) \cos^2(\Delta\omega t) \sin(\omega t) + (r_+ + r_-) \sin(\Delta\omega t) \cos(\Delta\omega t) \cos(\omega t) \\ &= (r_+ - r_-) \sin(\omega t).\end{aligned}\quad (53)$$

Das ist ein Ellipsenumlauf in Hauptachsenlage in dem rotierenden System der Koordinaten ξ, η . Die Halbachsen sind $A = r_+ + r_-$ und $B = r_+ - r_-$. Demnach könnte man die Bahn des Punktes in dem ursprünglichen System der Koordinaten x, y als eine „Ellipse, die sich langsam dreht“ charakterisieren. Die Abbildung 3 zeigt die Bahnkurve einer solchen Punktbewegung.

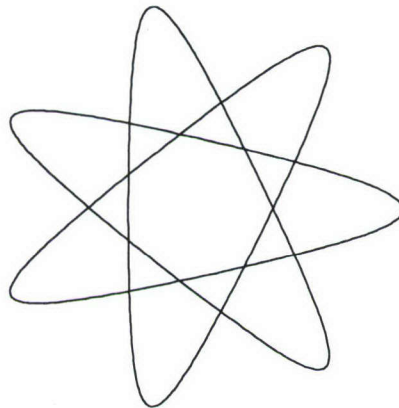


Abb. 3: Schwebung eines prograden und eines retrograden Kreisumlaufs mit $r_+ = 1$; $\omega_+ = 0,3$; $r_- = 0,5$; $\omega_- = 0,4$

5 Dynamische Aspekte

Die Bewegung eines Punktes in einer Ellipsenbahn erinnert an eine Planetenbewegung nach den Keplerschen Gesetzen. Allerdings unterscheidet sich eine Keplersche Planetenbewegung deutlich von einer

Bahnbewegung gemäss (1); denn nach dem zweiten Keplerschen Gesetz ist der Betrag der Geschwindigkeit des Planeten an zwei diametral einander gegenüberliegenden Stellen der Bahnellipse im allgemeinen nicht gleich, weil die Entfernung von dem Brennpunkt, in dem die Sonne sich befindet, jeweils eine andere ist. Bei einer Ellipsenbewegung der hier beschriebenen Art (1, 13, 14) ist dagegen die Geschwindigkeit in allen vier Quadranten symmetrisch. Eine solche Bewegung eines Massenpunktes kann daher nicht durch eine Kraft, die zu einem Brennpunkt der Ellipse gerichtet ist und deren Betrag dem Quadrat der Entfernung von diesem Brennpunkt umgekehrt proportional ist, erzeugt werden.

Es stellt sich dann die Frage, ob sie durch eine andere, zu einem Zentrum gerichtete Kraft erzeugt werden kann und, wenn ja, wo dieses Zentrum liegt und in welcher Beziehung der Betrag der Kraft zur Entfernung von dem Zentrum steht.

Der umlaufende Punkt sei mit der konstanten Masse m ausgestattet. Seine Ortskoordinaten lauten bei einer allgemeinen Ellipsenbewegung in orthogonaler Darstellung gemäss (14)

$$\begin{aligned}x &= a \cos(\omega t) - b \sin(\omega t), \\y &= c \sin(\omega t) + d \cos(\omega t).\end{aligned}\tag{54}$$

Durch Differentiation folgen die Geschwindigkeitskoordinaten zu

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -\omega a \sin(\omega t) - \omega b \cos(\omega t), \\\dot{y} &= \omega c \cos(\omega t) - \omega d \sin(\omega t).\end{aligned}\tag{55}$$

Daraus ergibt sich der Betrag des Drehimpulses in bezug auf den Mittelpunkt der Ellipse zu

$$h = m(x\dot{y} - y\dot{x}) = m\omega(ac + bd) = \text{const.}\tag{56}$$

Entsprechend dem Flächensatz ist damit die Ableitung der von dem Ortsvektor überstrichenen Fläche nach der Zeit konstant, und die Kraft, die den Massenpunkt auf seiner elliptischen Bahn hält, ist folglich eine auf den Mittelpunkt der Ellipse gerichtete Zentralkraft. Dies bestätigt sich dadurch, dass der Beschleunigungsvektor immer dem Ortsvektor entgegengerichtet ist:

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= -\omega^2 a \cos(\omega t) + \omega^2 b \sin(\omega t) = -\omega^2 x, \\\ddot{y} &= -\omega^2 c \sin(\omega t) - \omega^2 d \cos(\omega t) = -\omega^2 y.\end{aligned}\tag{57}$$

Der Betrag der Beschleunigung ist dem Betrag des Ortsvektors proportional, und so ist auch die Kraft mit dem Betrag

$$f = m\omega^2 \sqrt{x^2 + y^2}\tag{58}$$

der Entfernung des Massenpunktes vom Mittelpunkt der Ellipse proportional.

Die potentielle Energie des Massenpunktes in diesem Kraftfeld ist

$$\begin{aligned}V &= \frac{1}{2} m \omega^2 (x^2 + y^2) \\&= \frac{1}{2} m \omega^2 \{(a^2 + d^2) \cos^2(\omega t) + (b^2 + c^2) \sin^2(\omega t) - 2(ab - cd) \sin(\omega t) \cos(\omega t)\}.\end{aligned}\tag{59}$$

Seine kinetische Energie ist

$$\begin{aligned}T &= \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \\&= \frac{1}{2} m \omega^2 \{(a^2 + d^2) \sin^2(\omega t) + (b^2 + c^2) \cos^2(\omega t) + 2(ab - cd) \sin(\omega t) \cos(\omega t)\}.\end{aligned}\tag{60}$$

Die Summe der beiden Energieanteile ist erwartungsgemäss konstant:

$$V + T = \frac{1}{2} m \omega^2 (a^2 + b^2 + c^2 + d^2) = \text{const.}\tag{61}$$

LOKALE GEOIDBESTIMMUNG IM INNTAL-NETZ

Dr.-Ing. Klaus Krack
Dipl.-Ing. Bernd Scherer

Institut für Geodäsie
Universität der Bundeswehr München
85577 Neubiberg

Zusammenfassung

Die lokale Geoidbestimmung im Inntal hat zum Ziel, für ein begrenztes Messgebiet GPS-bestimmte geometrisch definierte ellipsoidische Höhenunterschiede Δh mit dem realen Schwerfeld zu verknüpfen. Dazu werden zwischen ausgewählten Stützpunkten des GPS-Netzes zusätzliche schwerfeldgebundene Beobachtungen durchgeführt wie Nivellements, Schweremessungen und astro-geodätische Ortsbestimmungen (Position und Richtung). Damit ergeben sich punktweise gewonnene Aussagen über den Geoidverlauf relativ zur Fläche des Bezugsellipsoids. Anschließend wird versucht, durch geeignete Modelle den Geoidverlauf durch eine Flächenfunktion zu beschreiben.

Im Inntal-Netz der Universität der Bundeswehr München, das sich am Alpenrand in einer Zone signifikanter Geoidänderungen befindet, wird zum einen durch ein einfaches Polynommodell (deterministische Prädiktion) und zum anderen durch einen strengen Ausgleichungsansatz unter Verwendung sämtlicher verfügbarer Beobachtungen der Geoidverlauf dargestellt. Die erzielten Ergebnisse werden mit der deutschlandweiten Quasigeoiddarstellung EGG97 verglichen.

Eine besondere Beachtung bei der Geoidbestimmung muß der orthometrischen Korrektur ΔE als Resultat der Nichtparallelität der Niveauflächen im realen Schwerfeld zukommen. Es zeigt sich, daß die zugrundeliegende Dichtehypothese die Genauigkeit der Geoidbestimmung kaum negativ beeinflusst.

Die realistische Modellierung des Geoidverlaufs hängt entscheidend von der Auswahl und Anzahl der GPS-tauglichen Stützpunkte ab. Es muß festgestellt werden, daß gerade im Übergang zwischen Flachland und Gebirge die Stützpunktdichte zu gering ist, da durch die topografischen Gegebenheiten GPS-Beobachtungen dort nur eingeschränkt möglich sind.

1 Einleitung

Aus der alltäglichen Vermessungspraxis sind GPS-Beobachtungen nicht mehr wegzudenken. Das Verfahren liefert nach der Auswertung automatisch Punktinformationen in allen drei Dimensionen, allerdings relativ zu einem ellipsoidischen, rein geometrisch definierten Bezugssystem.

Dieser Umstand macht sich besonders bei der Betrachtung von GPS-Höhen und -Höhenunterschieden im Vergleich mit nivellierten Höhenunterschieden bemerkbar. Im allgemeinen wird die Bestimmung von Höhen verlangt, die sich am realen Schwerfeld der Erde orientieren. GPS-bestimmte Höhen erlangen erst in Verbindung mit einem Geoidmodell diese Eigenschaft.

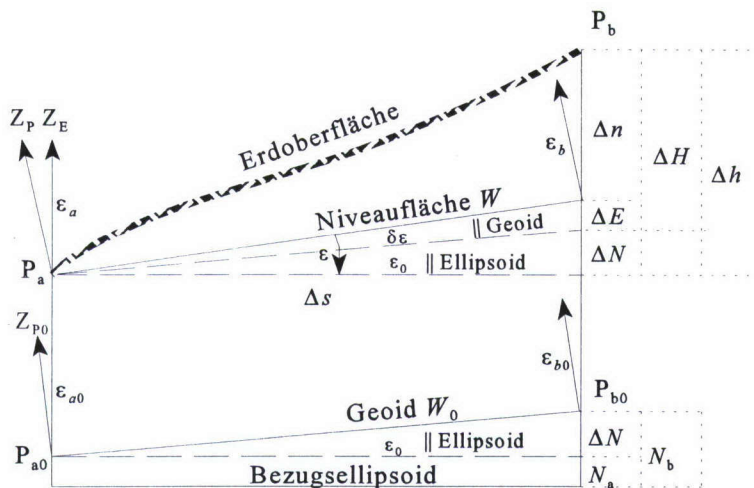


Abbildung 1

Im Rahmen einer lokalen Geoidbestimmung soll für ein abgegrenztes Meßgebiet die Geometrie der Geoidfläche relativ zu derjenigen des Bezugsellipsoids flächenhaft beschrieben werden. Als Ziel soll die Überführung von GPS-Höhenunterschieden Δh in orthometrische Höhenunterschiede ΔH als Funktion des Ortes mit möglichst hoher Genauigkeit ermöglicht werden. Der Sachverhalt ist in Abbildung 1 dargestellt.

Der vorliegende Beitrag zeigt ein praktisch erprobtes Beispiel aus dem Inntal-Netz. Dieses Meßgebiet eignet sich besonders

für Geoiduntersuchungen, weil es große Höhenunterschiede auf engem Raum aufweist. Die Effekte, die für die Abweichung physikalisch definierter Höhensysteme von ellipsoidischen verantwortlich sind, zeigen sich signifikant.

2 Grundlagen zur lokalen Geoidbestimmung

Im diesem Abschnitt sollen die im folgenden benötigten Definitionen zur lokalen Geoidbestimmung kurz dargestellt werden. Details zu den Höhensystemen finden sich bei SCHÖDLBAUER (1993b) sowie bei WEBER/SHELLEIN (1986). Eine allgemeine Darstellung der Geoidbestimmung und der damit zusammenhängenden Problematik kann man GURTNER (1978) entnehmen.

Für die lokale Geoidbestimmung scheiden gravimetrische Geoidmodelle, vgl. DENKER (1996) und DECKER (1998), die auf der Anwendung der STOKESSchen Formel basieren, aus. Das abgegrenzte Meßgebiet stellt eine zu schmale Datenbasis für die Parametrisierung der Modelle dar.

Aus geometrischer Sicht kann eine lokale Geoidbestimmung immer über den Vergleich korrespondierender Größen im ellipsoidischen System (durch GPS-Beobachtungen) und im physikalisch orientierten System (Beobachtungen mit horizontierten Meßgeräten), jeweils bezogen auf die selbe Meßmarke, durchgeführt werden. Dabei sind gemäß Abbildung 1 zwei verschiedene Ansätze denkbar:

- ❶ Vergleich der Höhen
- ❷ Vergleich der Lotrichtungen Z_P und Z_E
 - ① astro-geodätische Beobachtungen
 - ② Zenitdistanzbeobachtungen

Der Ansatz über den Vergleich von Zenitdistanzen wurde nicht weiter verfolgt. Die gleichzeitig-gegenseitige Beobachtung von Zenitdistanzen ζ zur weitgehenden Elimination von Refraktionseinflüssen bedingt einen erhöhten Meßaufwand. Die im weiteren notwendigen Anforderungen an die Konfiguration des Punktfeldes könnten in der Regel nur schwer erfüllt werden.

2.1 Geoidbestimmung durch Vergleich der Höhen

Das klassische Beobachtungsverfahren in einem am Schwerfeld der Erde orientierten Höhensystem ist das geometrische Nivellement, siehe WEBER/SHELLEIN (1987). Zwischen zwei Punkten P_a und P_b liefert es einen nivellierten Höhenunterschied Δn , durch die Modellierung der Wegabhängigkeit mit Hilfe der orthometrischen Korrektur ΔE , siehe Abschnitt 2.4, erhält man daraus zunächst den orthometrischen Höhenunterschied ΔH . Der Vergleich von ΔH mit dem ellipsoidischen Höhenunterschied Δh aus der GPS-Auswertung ergibt den entsprechenden Geoidhöhenunterschied ΔN .

$$\Delta N = \Delta h - \Delta n - \Delta E = \Delta h - \Delta H \quad (1)$$

2.2 Geoidbestimmung durch Vergleich der Lotrichtungen

Der Vergleich der Lotrichtungen führt auf den Begriff der Lotabweichung, siehe WOLF (1981) und SIGL (1975, Seite 11). Die Lotabweichung in einem realen Meßpunkt P_a ist definiert als der Unterschied zwischen der physikalischen und der ellipsoidischen Lotrichtung. Die Lotrichtungen werden durch Lotrichtungssparameter beschrieben:

- ▶ physikalische Lotrichtung Z_p : astro-geodätische Länge λ , astro-geodätische Breite φ
- ▶ ellipsoidische Lotrichtung Z_e : ellipsoidische Länge L , ellipsoidische Breite B

Dann sind die beiden Lotabweichungskomponenten in Länge und Breite η und ξ in einem Punkt P_a folgendermaßen definiert:

$$\begin{aligned} \eta &= (\lambda - L) \cos B \\ \xi &= \varphi - B \end{aligned} \quad (2)$$

wobei η alternativ nach (27) über Azimutbeobachtungen α bestimmt werden kann. Betrachtet man nun die Verbindung von P_a zu einem zweiten Punkt P_b , läßt sich die wirksame Komponente ε der Lotabweichung auf Punkt P_a im Azimut A der Verbindungslinie durch Projektion von (2) angeben.

$$\varepsilon = \eta \sin A + \xi \cos A \quad (3)$$

Der Wert ε gibt laut Abbildung 1 im Punkt P_a die Neigung der Niveauläche W gegenüber der Ellipsoidfläche in der Richtung zu P_b an. Nach TORGE (1975, Seite 160) läßt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Lotabweichung ε und Geoidhöhenunterschied ΔN wie folgt beschreiben:

$$\Delta N = - \int_{P_a}^{P_b} \varepsilon ds - \Delta E = - \varepsilon_m \Delta s - \Delta E = - \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b}{2} \Delta s - \Delta E \quad (4)$$

Als Konsequenz bedeutet dies für die Konfiguration des Punktfeldes, daß in solchen Bereichen des Meßgebietes, in denen durch die physikalischen Einflüsse der Ansatz eines linearen Modells – wie in (4) durch die rechte Gleichung beschrieben – nicht gerechtfertigt erscheint, die Punktdichte soweit erhöht werden muß, daß ein Mittelwert aus den Lotabweichungen ε_a und ε_b die Verhältnisse zwischen beiden Punkten entsprechend der angestrebten Genauigkeit beschreibt, siehe GURTNER (1978, Kapitel 4.1 und Kapitel 6.7). Der resultierende Modellfehler δN der Geoidbestimmung über Lotabweichungen lautet:

$$\delta N = \left(\frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b}{2} - \varepsilon_m \right) \Delta s \quad (5)$$

wobei die "wahre" mittlere Lotabweichung ε_m a-priori nicht bekannt ist. Der Modellfehler kann eine Größenordnung annehmen, die in die Beobachtungsgenauigkeit astro-geodätischer Verfahren hineinreicht.

Zur Beobachtung der astro-geodätischen Lotrichtungparameter gibt es verschiedene Verfahren, siehe SIGL (1975), SCHERER (1998) sowie SEEBER/TORGE (1985). Im vorliegenden Fall kamen automatisierte Realisierungen der unten genannten Beobachtungsverfahren zum Einsatz. Dazu wurden elektronische Theodolite und ein angeschlossener PC verwendet. Mit diesem Instrumentarium kann das Prinzip des "unpersönlichen Mikrometers" realisiert werden, das den Beobachter von der Zeitnahme entbindet. Der Beobachter verfolgt lediglich den betreffenden Stern mit dem Theodolitfernrohr, während der PC in regelmäßigen Abständen (ca 1s) Meßwerte und Zeitpunkte anfordert, registriert und verarbeitet.

Die angewandten Meßverfahren weisen folgende Beobachtungsmerkmale auf:

Azimute α	Polaris	satzweise Horizontalwinkelmessung Polaris - Fernziel (Mire) 3 Sätze à 20 Einzelbeobachtungen (Polaris) in 2 Lagen
Breiten φ	Polaris	satzweise Zenitdistanzmessung Polaris 3 Sätze à 20 Einzelbeobachtungen (Polaris) in 2 Lagen
Breiten φ	STERNECK	paarweise Zenitdistanzmessungen zu Nord- und Südsterne mindestens 60 Einzelbeobachtungen pro Stern
Breiten φ	Astrolab	Durchgangszeiten von Sternen durch den Almukantarat $\zeta = 30^\circ$ Programmsystem ICARUS der ETH Zürich (IGP, 1988)
Längen λ	Astrolab	Durchgangszeiten von Sternen durch den Almukantarat $\zeta = 30^\circ$ Programmsystem ICARUS der ETH Zürich

Das vom Verfasser entwickelte Programmsystem bietet folgende Optionen:

- ❶ aktueller Beobachtungsplan und Einstelldaten (für STERNECK, Astrolab und Polaris), Benutzerführung
- ❷ Datenakquisition vom Theodolit (automatischer Datenfluß)
- ❸ Realisierung der UT-Zeit mit der notwendigen Genauigkeit (ca 0,01s) über DCF77
- ❹ Qualitätskontrolle des Beobachtungsmaterials
- ❺ Auswertung der Beobachtungen im Felde, online-Berechnung der Lotrichtungparameter

Das Prinzip des automatisierten "unpersönlichen Mikrometers" garantiert eine schnelle Meßabfolge mit hoher Redundanz der Sternbeobachtungen. Die Verweildauer auf den Meßpunkten betrug für Polarisbeobachtungen (Azimut α und Breiten φ) unter 30min, für die anderen Verfahren ca 1h. Kritisch anzumerken ist hier, daß die Polarisbeobachtungen zwar in kürzester Zeit rein rechnerisch die Lotabweichungskomponenten mit einer Genauigkeit für das Abendmittel von unter 1" ergeben, aber Fehler im Refraktionsmodell ganz in die Lotabweichungskomponente ξ in Breite eingehen. Deshalb sind "einseitige" Breitenbestimmungen mit dem Polarisstern durch refraktionsunempfindliche Verfahren wie STERNECK, siehe SCHERER (1998), und Astrolab zu überprüfen. In sternklaren Nächten wurde eine durchschnittliche Arbeitsleistung von 4 Aufstellungen erreicht.

2.3 Bewertung der Verfahren

Beide Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich Meßaufwand und Genauigkeitspotential.

Aus der Analyse der Beobachtungen lassen sich a-priori folgende innere Genauigkeitsmaße für die Beobachtungen im Inntal-Netz zugrundelegen:

Verfahren	Teilaspekt	Standardabweichung σ
Nivellement Δn	gesamtes Netz Anschlußnivellements	$\sigma(\Delta n) = 0,0012\text{m}/\sqrt{\text{km}}$ $\sigma(\Delta n) = 0,0007\text{m}/\sqrt{\text{km}}$
GPS-Höhenunterschiede Δh	Grundnetz (3h bis 4h Beobachtungszeit) Füllnetz (< 0,5h Beobachtungszeit)	$\sigma(\Delta h) = 0,005\text{m}$ $\sigma(\Delta h) = 0,011\text{m}$
Azimute α	Diplomarbeiten bis 1992 Beobachtungen der Verfasser Diplomarbeit 1997 ICARUS (konventionelle Satzmessung)	$\sigma(\alpha) = 1,3''$ $\sigma(\alpha) = 1,0''$ $\sigma(\alpha) = 2,5''$ $\sigma(\alpha) = 2,8''$
Breiten φ	Verfasser (Polaris, STERNECK) STERNECK (Programm ICARUS) Astrolab (Programm ICARUS) Astrolab bis 1989	$\sigma(\varphi) = 1,0''$ $\sigma(\varphi) = 1,0''$ $\sigma(\varphi) = 1,0''$ $\sigma(\varphi) = 1,7''$
Längen λ	Astrolab (Programm ICARUS) Astrolab bis 1989	$\sigma(\lambda) = 2,7''$ $\sigma(\lambda) = 1,2''$

Damit darf man erwarten, aus den astro-geodätischen Beobachtungen die Lotabweichungen ε im Azimut A mit einer Genauigkeit von $\sigma(\varepsilon) = 1''$ bis $2''$ ableiten zu können, was einem Geoidhöhenunterschied ΔN von $0,005\text{m}$ bis $0,010\text{m}$ bei Punktabstand von $\Delta s = 1000\text{m}$ entspricht.

In einer ersten qualitativen Schlußfolgerung liefert daher die Geoidbestimmung durch Vergleich der Höhen nach (1) a-priori die zuverlässigeren Resultate gegenüber einer Geoidbestimmung über Lotabweichungen nach (4).

2.4 Die orthometrische Korrektur

Die Beobachtungen werden immer in den betreffenden Aufpunkten an der Erdoberfläche durchgeführt. Infolgedessen sind die Verhältnisse der Niveaufläche W in P_a maßgeblich. Der Einfluß der Nichtparallelität der Niveauflächen im realen Schwerfeld muß beim Übergang von W auf das Geoid W_0 (Fußpunkte P_{a0} und P_{b0} , siehe auch Abbildung 1) berücksichtigt werden.

Die orthometrische Korrektur ΔE beschreibt die Veränderungen des Abstandes zwischen W und W_0 und wandelt damit nivellierte Höhenunterschiede Δn in orthometrische Höhenunterschiede ΔH laut (1) um. Zur Bestimmung dieser Veränderungen werden Schwereinformationen aus dem nicht zugänglichen Bereich zwischen P_a und P_{a0} bzw P_b und P_{b0} benötigt. Diese Werte kann man nur bestimmen, wenn man die Dichteverteilung kennt oder zumindest durch plausible Hypothesen beschreiben kann, siehe GURTNER (1978, Kapitel 4.3.4) und HEISKANEN/MORITZ (1967, Seite 167).

$$\Delta E = \frac{\frac{g_a + g_b}{2} - \gamma_0}{\gamma_0} \Delta n + \frac{g_a - \frac{\partial \bar{g}}{\partial H} \frac{H_a}{2} - \gamma_0}{\gamma_0} H_a - \frac{g_b - \frac{\partial \bar{g}}{\partial H} \frac{H_b}{2} - \gamma_0}{\gamma_0} H_b \quad (6)$$

Diese Formel gilt nicht für beliebige Punktentfernungen. Der Wert des inneren Schweregradienten $\partial \bar{g} / \partial H$ in Gleichung (6) ist abhängig von der mittleren Dichte entlang der betreffenden Lotlinie. Im folgenden werden für ΔE die Zahlenwerte einer üblichen Dichtehypothese nach HELMERTs Kondensationsmethode, siehe HELMERT (1884), angesetzt. Dazu wird eine homogene Struktur mit einer konstanten Dichte von $\rho_m = 2670\text{kg/m}^3$ (mittlere Dichte der kontinentalen Erdkruste) unterstellt. Für das WGS84-Ellipsoid gilt dabei für $\gamma_0 = 9,80613018\text{m/s}^2$ (Normalschwerewert bei Breite $B = 45^\circ$ und Höhe $h = 0\text{m}$), siehe AMILGEO (1988, Seite 4-3).

$$\frac{\partial \bar{g}}{\partial H} = -8,48 \cdot 10^{-7} [1/s^2] = -0,0848 [\text{mGal/m}] \quad (7)$$

Die tatsächliche Gültigkeit der Hypothese läßt sich in der Regel nicht nachweisen, da keine Sollwerte vorliegen. Dazu wären detaillierte Untersuchungen der Zusammensetzung der Erdkruste in der Umgebung des Meßgebiets notwendig. Aus geologischen Karten kann man immerhin abschätzen, inwieweit die unterstellte mittlere Dichte ρ_m mit den tatsächlichen Verhältnissen übereinstimmt. Bei Abweichungen kann der innere Schweregradient in (7) entsprechend angepaßt werden. Dies war im Fall des Inntal-Netzes nicht notwendig.

Der Einfluß der Dichtehypothese ist in erster Linie proportional zu den absoluten Höhenwerten H . Eine Verringerung dieses Einflusses wird erreicht, indem man H nicht mehr auf das Geoid W_0 sondern auf eine beliebige Niveauläche W_1 bezieht, z.B. auf diejenige, die durch den niedrigsten Punkt des Meßgebiets verläuft. Für weitere Untersuchungen ist auch der Bezug auf die Niveauläche W_1 durch den am höchsten gelegenen Punkt denkbar; diese liegt für das Meßgebiet stets ganz außerhalb des Erdkörpers. Dabei muß in (6) in der Einheit $[1/s^2]$ der innere Schweregradient nach (7) durch den Gradienten der Freiluftreduktion $-3,086 \cdot 10^{-6}$ ersetzt werden. Die Höhenwerte H sind dann sämtlich negativ.

Verwendet man diese alternativ bestimmten orthometrischen Korrekturen ΔE in den Gleichungen (1) und (4), so muß man sich allerdings im klaren sein, daß dann mit $\Delta N \doteq \Delta N_1$ der Verlauf von W_1 – und nicht derjenige der Geoidfläche W_0 – beschrieben wird. Die Niveaulächenhöhenunterschiede ΔN_1 sind dabei weniger stark von den Modellfehlern einer unzutreffenden Dichtehypothese beeinflusst und nichtsdestotrotz geeignet für eine Umsetzung ellipsoidischer Höhenunterschiede Δh in physikalisch orientierte Höhensysteme. Auf W_1 bezogene orthometrische Höhen weichen jedoch von den amtlichen Höhenangaben ab und sind nur für lokale Projekte verwendbar.

Im folgenden wird abgeschätzt, mit welcher Genauigkeit sich eine Geoidbestimmung durchführen läßt angesichts der Auswirkungen der Modellfehler, die die Dichtehypothese für die orthometrische Korrektur in (6) hervorruft. Berechnet wird die Genauigkeit $\sigma(\Delta E)$ der orthometrischen Korrektur für eine typische Punktverbindung im Inntal-Netz.

Punktverbindung	typisch	ungünstig
Punktabstand Δs	2000m	5000m
Höhenunterschied Δn	100m	1000m
absolute Höhenlage H	$700\text{m} \pm \Delta n/2$	$1300\text{m} \pm \Delta n/2$

Zuerst wird angenommen, die Dichte sei ohne Fehler bekannt, und die Schwerewerte g stünden mit einer Genauigkeit von $0,000001\text{m/s}^2$ (entspricht $0,1\text{mGal}$) zur Verfügung. In diesem theoretischen Fall ergibt sich $\sigma(\Delta E) = 0,0001\text{m}$, also weit innerhalb des Meßrauschens.

Nun soll aber für die Dichte eine realistische Genauigkeit von $\sigma(\rho_m) = 200\text{kg/m}^3$ (typischer Wert für die Verhältnisse im Inntal-Netz, vgl. Geologische Karte im Maßstab 1:25.000 “8238 Neubauern”, herausgegeben durch das Bayerische Geologische Landesamt, München) gelten. Dann kann aus der BRUNSSchen Formel, siehe TORGE (1975, Seite 38), der resultierende Einfluß auf den inneren Schweregradienten in (6) zu $1,7 \cdot 10^{-7}$ in der Einheit $[1/s^2]$ abgeleitet werden. Zwar können unter diesen Voraussetzungen die mittleren Schwerewerte zwischen W und W_0 aufgrund der Unsicherheit für die Dichte nur noch auf ca $0,00006\text{m/s}^2$ (entspricht 6mGal) genau angegeben werden. Jedoch bleibt nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz die Genauigkeit der orthometrischen Korrektur mit $\sigma(\Delta E) \sim 0,001\text{m}$ immer noch unter der Meßgenauigkeit.

Lediglich bei unvermeidlichen größeren Punktentfernungen, insbesondere bei solchen mit großen Höhenunterschieden, muß man geringe Abschläge von diesem Idealwert hinnehmen. Für eine ungünstige Punktkombination (siehe oben) erreicht $\sigma(\Delta E) \sim 0,005\text{m}$.

Die Modellierung der orthometrischen Korrektur ΔE spaltet eine Geoidbestimmung in einen hypothesenfreien und einen hypothesenbehafteten Anteil. In der Summe $\Delta N + \Delta E$ kompensiert sich der Einfluß der Dichtehypothese. Diese Summe ist also immer hypothesenfrei bestimmbar, ist aber wie das Nivellement wegababhängig, erlaubt keine Bestimmung orthometrischer Höhen H und hat deswegen hier nur theoretische Bewandtnis. Die Genauigkeit, mit der $\Delta N + \Delta E$ aus den Beobachtungen bestimmbar ist, kann aber verwendet werden, um das Genauigkeitspotential einer Geoidbestimmung abzuleiten. Das Potential wird ausgeschöpft, falls die Dichtehypothese tatsächlich zutrifft und keinen Modellfehler erzeugt, also die Genauigkeit $\sigma(\Delta E) = 0$ beträgt. In diesem theoretischen Fall kann dann gesetzt werden: $\sigma(\Delta N + \Delta E) \equiv \sigma(\Delta N)$.

Die Kombination von (1) und (4) ergibt den Vergleich der hypothesenfreien Anteile der Geoidbestimmung:

$$\Delta N + \Delta E = -\varepsilon_m \Delta s = \Delta h - \Delta n \quad (8)$$

Mit den in Abschnitt 2.3 aufgeführten Beobachtungsgenauigkeiten ist das theoretische Genauigkeitspotential der Geoidbestimmung folgendermaßen beschränkt:

- ▶ durch die Genauigkeit der GPS-Höhenunterschiede $\sigma(\Delta h)$ entfernungsunabhängig auf **ca 0,005m bis 0,010m**
- ▶ durch die Genauigkeit der Lotabweichungen $\sigma(\varepsilon)$ entfernungsabhängig mit $\sigma(\varepsilon) \Delta s$ bei typischer Punktentfernung $\Delta s = 2000\text{m}$ also **ca 0,010m bis 0,020m**

Offensichtlich darf man stets erwarten, daß die Bestimmung von Geoidhöhenunterschieden ΔN durch Nivellement und GPS-Höhenunterschiede bessere Resultate liefert als das Verfahren mit Lotabweichungen. Erst bei Punktentfernungen um $\Delta s < 1000\text{m}$ wird mit Lotabweichungen ein ähnlich gutes Ergebnis erzielt.

▶ Fazit:

Der Einfluß der orthometrischen Korrektur ΔE fällt gegenüber dem Genauigkeitspotential der Geoidbestimmung nicht ins Gewicht, falls die Punktabstände richtig gewählt werden. Insbesondere müssen Strecken mit großen Höhenunterschieden durch Zwischenpunkte unterteilt werden. Das Ziel eines "Zentimeter-Geoids" ist also auf lokaler Ebene theoretisch erreichbar.

2.5 Reduktion von Beobachtungen auf Geoidniveau

Im Rahmen der Geoidbestimmung müssen die Lotrichtungsbeobachtungen in den Aufpunkten aus dem Niveau W an der Erdoberfläche in das Niveau W_0 (Geoid) und umgekehrt überführt werden. Dieser Übergang ist infolge der Nichtparallelität der Niveauflächen bekanntlich nicht hypothesenfrei möglich. Siehe dazu besonders GURTNER (1978, Kapitel 4.3.4).

Bei Betrachtung von (8) und Abbildung 1 kann die Geoidbestimmung aus Lotabweichungen in zwei Anteile aufgespalten werden:

$$\begin{aligned} \Delta N &= -\varepsilon_{m0} \Delta s \\ \Delta E &= -\delta\varepsilon_m \Delta s \end{aligned} \quad (9)$$

wobei gilt:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{m0} + \delta\varepsilon_m \quad (10)$$

Dann ist $\delta\varepsilon$ die **Lotkrümmung** und damit der Reduktionsbetrag, der die Lotabweichung ε vom Beobachtungsniveau W in das Geoidniveau W_0 überführt. Den Gleichungen (3) und (4) entsprechend ist die Geoid-Lotabweichung ε_{m0} im Azimut A mit den Geoid-Lotabweichungskomponenten η_b (in Länge) und ξ_0 (in Breite) der Punkte P_{a0} und P_{b0} folgendermaßen verknüpft:

$$\varepsilon_{m0} = \frac{\eta_{a0} + \eta_{b0}}{2} \sin A + \frac{\xi_{a0} + \xi_{b0}}{2} \cos A \quad (11)$$

Die Geoid-Lotabweichungen η_0 und ξ_0 sind nach WOLF (1981, Seite 23) und GURTNER (1978, Seite 16) die Neigungen der Geoidfläche gegenüber dem Bezugsellipsoid:

$$\begin{aligned} \eta_0 &= \eta - \delta\eta = -\frac{1}{R \cos B} \frac{\partial N}{\partial L} \\ \xi_0 &= \xi - \delta\xi = -\frac{1}{R} \frac{\partial N}{\partial B} \end{aligned} \quad (12)$$

Für den lokalen Krümmungshalbmesser kann stets gesetzt werden $R = 6380000\text{m}$. Damit können Geoid-Lotabweichungen über eine bivariate Funktion $N(L, B)$ punktweise abgeleitet und flächenhaft interpoliert werden. Gesucht sind aber die zugehörigen Lotabweichungen im Niveau W .

Nach HEISKANEN/MORITZ (1967, Seite 194/195) können die Komponenten $\delta\eta$ (in Länge) und $\delta\xi$ (in Breite) der Lotkrümmung entweder über die mittlere Horizontalableitung der Schwere oder über die orthometrische Korrektur ΔE ermittelt werden. Die Projektion $\delta\varepsilon$ der Komponenten $\delta\eta$ und $\delta\xi$ in das Azimut A einer Punktverbindung läßt sich aber bei entsprechender Punktkonfiguration gemäß Abbildung 2 auch einfach bestimmen:

$$\delta\varepsilon = -\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta s} \quad (13)$$

Gesucht sind die Komponenten $\delta\eta$ und $\delta\xi$ von (13). Zu deren Berechnung in einem Punkt P_a muß die Punktkonstellation spezielle Bedingungen erfüllen:

- ① Zentrum P_a muß mindestens 2 Exzentren P_{a1} und P_{a2} besitzen
- ② Punktabstände Zentrum \leftrightarrow Exzentrum idealerweise $400\text{m} < \Delta s < 1000\text{m}$
- ③ Punktkonstellation sollte in P_a einen rechten Winkel bilden, d.h. $|A_{a1} - A_{a2}| \approx 100\text{gon}$ oder 300gon

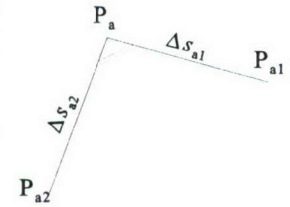


Abbildung 2

Auf P_a , P_{a1} und P_{a2} müssen Schwerebeobachtungen g vorliegen. Es müssen auch (für den Ansatz über ΔE) nivellierte Höhenunterschiede Δn beobachtet werden. Das Einhalten der geometrischen Bedingungen ist notwendig, um die Signifikanz der abgeleiteten Lotkrümmung zu gewährleisten.

Wenn die Voraussetzungen aber erfüllt sind, gelten die (mindestens) zwei unabhängigen Gleichungen (14).

$$\begin{aligned} \delta\varepsilon_{a1} &= -(\Delta E / \Delta s)_{a1} \doteq \delta\eta_a \sin A_{a1} + \delta\xi_a \cos A_{a1} \\ \delta\varepsilon_{a2} &= -(\Delta E / \Delta s)_{a2} \doteq \delta\eta_a \sin A_{a2} + \delta\xi_a \cos A_{a2} \end{aligned} \quad (14)$$

Daraus resultieren die Lotkrümmungskomponenten $\delta\eta$ und $\delta\xi$ im Punkt P_a durch Auflösung des Gleichungssystems, für zwei Exzentren eindeutig nach (15), für mehr Punkte durch Ausgleichung.

$$\begin{pmatrix} \delta\eta_a \\ \delta\xi_a \end{pmatrix} = \frac{1}{\sin(A_{a1} - A_{a2})} \begin{pmatrix} \cos A_{a2} & -\cos A_{a1} \\ -\sin A_{a2} & \sin A_{a1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta\varepsilon_{a1} \\ \delta\varepsilon_{a2} \end{pmatrix} \quad (15)$$

Nun können Lotabweichungen, die aus der lokalen flächendeckenden Geoidbestimmung resultieren, in das Niveau W der Beobachtungen überführt bzw. aus Beobachtungen entsprechende Geoid-Lotabweichungen abgeleitet werden.

Die Ausführungen dieses Abschnitts gelten auch sinngemäß für den Fall, daß anstatt des Geoidniveaus W_0 ein anderes beliebiges Bezugsniveau W_1 nach Abschnitt 2.4 verwendet wird, um den Einfluß der Dichtehypothese herabzusetzen.

2.6 Schwereinterpolation

Die Berechnung der Einflüsse der Nichtparallelität der Niveauflächen setzt die Kenntnis der Oberflächenschwere g in den betreffenden Punkten voraus. Für einen Punkt, dessen Schwerewert nicht durch Gravimeterbeobachtungen explizit bestimmt wurde, muß g durch Interpolation aus dem Punktfeld hervorgehen. Beobachtete Schwerewerte g liegen auf 23 Stützpunkten des Inntal-Netzes vor. Für eine flächenhafte Schwereinterpolation reicht diese Datenbasis noch nicht aus.

Weitere Angaben kann man den im Bereich des Inntal-Netzes verlaufenden Nivellementslinien I. und II. Ordnung des Bayerischen Landesvermessungsamtes in München (BLVA) entnehmen. Diese enthalten abschnittsweise GAUSS-KRÜGER-koordinierte Schwerefestpunkte (SFP), um für die Ausgleichung die Transformation der nivellierten Höhenunterschiede Δn in hypothesenfreie Potentialunterschiede Δc zu ermöglichen, siehe SCHÖDLBAUER (1993b, Seite 238, Gleichung 3-4). So konnte die schmale Datenbasis um 53 flächenhaft verteilte SFP erweitert werden. Wie Abbildung 3 belegt (Dreiecke), ist damit eine gute Abdeckung des Meßgebiets erreicht worden. Die den Geoidverlauf hier maßgeblich bestimmenden Nord-Süd-Komponenten der Nivellementslinien bedürfen für Genauigkeiten $< 0,005\text{m}$ jedoch einer weiteren Verdichtung durch zusätzliche SFP.

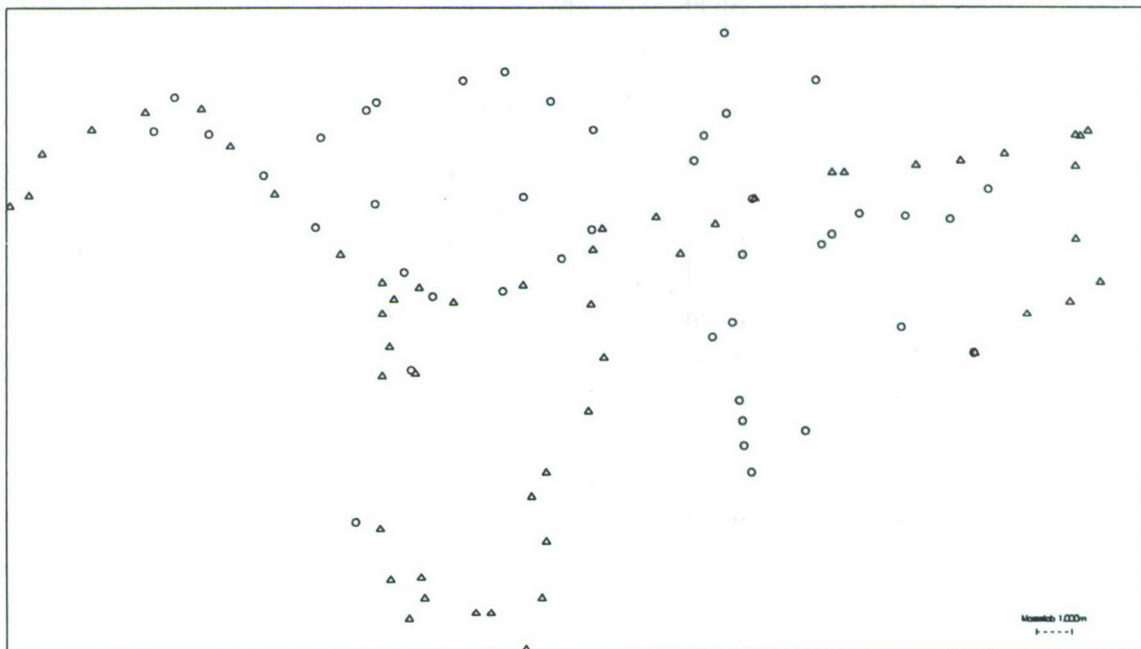


Abbildung 3

Für die Interpolation wurde ein einfacher Polynomansatz für die nach (16) BOUGUER-reduzierten Schwerewerte g_B verwendet, siehe HEISKANEN/MORITZ (1967, Seite 131). Dabei sind die Einflüsse der Topografie weitgehend eliminiert, so daß sich diese Schwerewerte wegen ihres ruhigen Funktionsverlaufs für eine Interpolation eignen.

$$g_B = g + 1,967 \cdot 10^{-6} H \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (16)$$

Die Ortsfunktion der Schwerewerte g_B sei ein Polynom 2. Grades. Die 6 Koeffizienten dieses Polynoms lassen sich aus den insgesamt 76 Gleichungen durch Ausgleichung bestimmen. Es ergibt sich folgende Ortsfunktion in lokal definierten konformen Koordinaten y, x laut Abschnitt 4.2 in der Einheit $[\text{m/s}^2]$ für den Bereich des Inntal-Netzes, Bezugspunkt der Polynomentwicklung ist der B-Netz-Punkt EB (im DREF: 70 Dettendorf), siehe Abbildung 5:

$$\begin{aligned}
g_B(y,x) = & 9,8076115 \quad [\text{m/s}^2] \\
& - 3,378 \cdot 10^{-9} \Delta y + 2,806 \cdot 10^{-8} \Delta x \\
& + 9,999 \cdot 10^{-14} \Delta y^2 - 1,712 \cdot 10^{-13} \Delta y \Delta x + 2,433 \cdot 10^{-13} \Delta x^2
\end{aligned} \tag{17}$$

Die Standardabweichung der Gewichtseinheit für die aus der Polynomentwicklung berechneten g_B beträgt $\sigma_0 = 0,000035 \text{m/s}^2$. Eine Analyse der Residuen ergibt eine Korrelation mit der Geländehöhe. Für Punkte im Niveau der Schotterebene zeigen sich Residuen bis zu $\pm\sigma_0$, auf Gebirgspunkten sind Residuen zwischen $-2\sigma_0$ (FP) und $-3\sigma_0$ (WS) zu verzeichnen. Die Erhöhung des Polynomgrades führt wegen der unsymmetrischen topografischen Gegebenheiten im Meßgebiet nicht zu einer wesentlichen Verfeinerung des mathematischen Modells.

Die Oberflächenschwerewerte g an beliebigen Punkten im Meßgebiet werden anschließend durch umgekehrte Anwendung von (16) aus den BOUGUER-Schwerewerten g_B erhalten.

Die erreichte Genauigkeit genügt für die Berechnung der orthometrischen Korrektur ΔE , siehe Abschnitt 2.4. Lediglich im Bereich der Gebirgspunkte führen die genannten Residuen bei ungünstigen Punktverbindungen dazu, daß in (1) und (4) die Fehler der orthometrischen Korrektur mit $\sigma(\Delta E) \sim 0,005 \text{m}$ in die Größenordnung der Beobachtungsfehler gelangen können.

2.7 Profil einer Punktverbindung Flachland - Gebirge

Am Beispiel des Punktes Farrenpoint (FP, $H \approx 1275 \text{m}$, Lage im Punktfeld siehe Abbildung 5) konnte der Funktionsverlauf der Lotkrümmung $\delta\epsilon(s)$ ausgehend von einem Punkt im Flachland (H1, $H \approx 505 \text{m}$) exemplarisch durch Zwischenpunkte bestimmt werden. Die Punkte sind durch eine Nivellementslinie II. Ordnung des BLVA miteinander verbunden. Da GPS-Beobachtungen zur Bestimmung ellipsoidischer Höhen h aufgrund der topografischen Situation nicht möglich sind, kann die Betrachtung nur mit Hilfe der orthometrischen Korrektur ΔE und der durch (13) theoretisch punktweise gegebenen Lotkrümmung $\delta\epsilon$ als Maß für die Nichtparallelität der Niveaulächen erfolgen. Sie gilt aber sinngemäß auch für Geoidhöhenunterschiede ΔN und -Lotabweichungen ϵ_0 .

In diskreten Abständen sind auf speziellen SFP Schwerebeobachtungen g vorhanden, die es erlauben, die nivellierten Höhenunterschiede Δn_i der Teilstücke mit den Endpunkten P_{ia} und P_{ib} nach (6) und (7) orthometrisch zu korrigieren. In symbolischer Schreibweise ist

$$\Delta E_i = f(g_{ia}, g_{ib}) \Delta n_i + f(g_{ia}, H_{ia}) H_{ia} - f(g_{ib}, H_{ib}) H_{ib} \tag{18}$$

Die Summe der so entstandenen orthometrischen Korrekturen ΔE_i der Teilstücke i wird gebildet.

$$\Delta E(k) = \sum_{i=1}^{i=k} \Delta E_i \quad \text{mit } k = 4 \text{ Teilstücken} \tag{19}$$

Die Summe $\Delta E(4)$ wird mit der orthometrischen Korrektur ΔE der Gesamtstrecke zwischen H1 und FP verglichen, wie sie sich aus dem linearen Ansatz (6) direkt mit (20) berechnen läßt:

$$\begin{aligned}
\Delta E &= f(g_{H1}, g_{FP}) \Delta n + f(g_{H1}, H_{H1}) H_{H1} - f(g_{FP}, H_{FP}) H_{FP} \\
&= -0,052 \text{m} + 0,021 \text{m} + 0,127 \text{m} = +0,096 \text{m}
\end{aligned} \tag{20}$$

Die Nivellementslinie befindet sich nahezu in der direkten Verbindungslinie zwischen beiden Punkten, so daß die Voraussetzungen für eine Unterteilung in Teilstücke und den Summenvergleich gegeben sind. Die Summe $\Delta E(4)$ ist nur dann mit der direkten Berechnung ΔE identisch, wenn ein linearer Funktionsverlauf vorliegt.

Die Punktverbindung zwischen Flachlandpunkt H1 und Gebirgspunkt FP zeigt Abbildung 4.

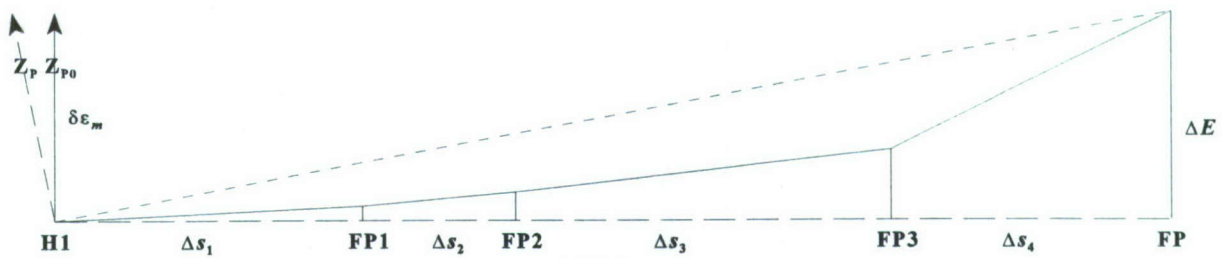


Abbildung 4

Durch die Verfügbarkeit von drei SFP der Nivellementsline (FP1, FP2, FP3) kann die Gesamtstrecke polygonzugweise in $k = 4$ Teilstücke zerlegt werden. Die folgende Tabelle belegt die zugehörigen Zahlenwerte für den Verlauf der Funktion.

Punkt	H [m]	Teilstück i	ΔE_i [m]	Δs_i [m]	$\delta \epsilon_i$ ["]	ΔE [m]	$\delta \epsilon$ ["]
H1	505						
FP1	557	1	+0,005	743	-1,33		
FP2	650	2	+0,007	390	-3,77		
FP3	877	3	+0,022	959	-4,69		
FP	1.274	4	+0,064	697	-19,08	+0,096	-7,09
Summen Mittel			$\Delta E(4) +0,098$	2789	$\delta \epsilon_m -7,26$	+0,096	$\delta \epsilon -7,09$

Offensichtlich ist im Falle dieser ausgewählten Punktverbindung trotz der Krümmungsänderung im Bereich zwischen FP3 und FP tatsächlich durch Zufall ein linearer Funktionsverlauf gegeben. Diese Feststellung ist allerdings erst unter Zuhilfenahme der Zwischenpunkte möglich. Der Vergleich mit den Einzelergebnissen der Teilstücke ergibt eine Übereinstimmung von 0,002m für die orthometrische Korrektur. Dies ist auch der Modellfehler (5), wie er sich aus dem Vergleich der Lotkrümmungen $\delta \epsilon_m$ und $\delta \epsilon$ ergibt.

3 Lokale Geoidbestimmung

Zur Darstellung der Geoidfläche relativ zur Fläche des Bezugsellipsoids sind verschiedene Ansätze denkbar, siehe z.B. GURTNER (1978). Im folgenden werden zwei Möglichkeiten näher untersucht:

- ① Polynomansatz (Ableitung einer Fläche aus Stützpunkten)
- ② Strenge Ausgleichung im GAUSS-MARKOFF-Modell, siehe KOCH (1980, Abschnitt 32)

Im Polynomansatz folgt die Geoidbestimmung aus einer rein deterministischen Prädiktion über die Beschreibung der Geometrie der Geoidfläche relativ zur Fläche des Bezugsellipsoids im Meßgebiet. Dabei werden nur die Beobachtungen in Betracht gezogen, die eine Geoidbestimmung nach (1) erlauben. Das Resultat ist eine kontinuierliche Geoiddarstellung über das gesamte Meßgebiet.

Im Rahmen der strengen Ausgleichung tragen alle Beobachtungen unmittelbar und individuell zur Geoidbestimmung an den Meßpunkten bei. Zur Prädiktion von Geoidhöhen für beliebige Punkte ist dann eine Interpolation des Ausgleichungsergebnisses notwendig, die beispielsweise ihrerseits durch einen Polynomansatz realisiert werden kann.

Die Möglichkeit, die Geoidbestimmung in einem GAUSS-HELMERT-Modell in einem gemischten Ansatz als stochastischen Prozeß aufzufassen (Kollokation, Prädiktion und Filterung), siehe KOCH (1980, Kapitel 352 und 356), wird hier nicht verfolgt, da das Feld der Stützpunkte diese Vorgehensweise nicht unterstützt (zu geringe Punktdichte).

3.1 Polynomansatz

Die Geometrie der Geoidfläche W_0 soll im Meßgebiet gegenüber der Fläche des Bezugsellipsoids mit Hilfe eines Polynoms 3. Grades beschrieben werden. Dieses Polynom ist eine Ortsfunktion $\Delta N(y, x)$ z.B. in Abhängigkeit konformer Koordinaten y und x :

$$\Delta N(y, x) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^{3-i} q_{ij} (y - y_0)^i (x - x_0)^j = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^{3-i} q_{ij} \Delta y^i \Delta x^j \quad (21)$$

Aus numerischen Gründen wird ein Punkt des Punktfeldes zum Bezugspunkt der Polynomentwicklung P_0 erhoben. Alle Geoidhöhenunterschiede ΔN , die mit (21) berechnet werden können, beziehen sich lagemäßig auf P_0 . Desgleichen berechnen sich die konformen Koordinatenunterschiede Δy und Δx für jeden Punkt relativ zu P_0 . Über das absolute Geoidhöhendatum im Bezugspunkt N_0 kann a-priori frei verfügt werden. Die Festlegung äußert sich in Form einer gleichzeitigen Parallelverschiebung von Bezugsellipsoid- und Geoidfläche gemäß Abbildung 1 und beeinflusst damit die Geoidbestimmung nicht. Eine zweckmäßige Vorgabe ist stets $N_0 = 0,000\text{m}$.

Die Wahl des Polynomgrads ist abhängig vom vorgefundenen Geländetyp und der möglichen Realisierung durch Stützpunkte. Die Verhältnisse im Testnetz Inntal sprechen wegen der durch das Inntal gegebenen Symmetrie für eine mathematische Modellbildung durch ein Polynom 2. oder 4. Grades. Jedoch haben Testrechnungen gezeigt, daß die 6 Koeffizienten eines Polynoms 2. Grades den abrupten Übergang von Schotterebene zu Hochgebirgsregion nur sehr unvollkommen erfassen können, und daß für die Bestimmung der 15 Koeffizienten eines Polynoms 4. Grades die Punktdichte der Stützpunkte nicht ausreicht, was sich durch eine unrealistische Aufbiegung der Flächendarstellung zwischen den Punkten äußert. Als Kompromiß muß daher ein Polynom 3. Grades angesetzt werden.

Die zunächst noch unbekannten 10 Koeffizienten q dieses Polynoms müssen aus Funktionswerten in den Stützpunkten bestimmt werden. Die notwendige Bestimmung von Funktionswerten $\Delta N(y, x)$ erfolgte ausschließlich über Nivellementsbeobachtungen nach Gleichung (1), die gemäß den Ausführungen in Abschnitt 2.3 aus Genauigkeitsgründen der Lotabweichungsmethode vorzuziehen sind.

Die Gleichung (21) ist in den Koeffizienten q bereits linear. Bei der Bestimmung von q ist zu beachten:

- Geoidhöhenunterschiede ΔN in den Stützpunkten relativ zu P_0 berechnen

Es muß dafür gesorgt werden, daß eventuell durch entsprechende Verkettung von Beobachtungen für jeden Stützpunkt eine dem Funktionsansatz entsprechende "quasi-absolute" Geoidhöhe ΔN zur Verfügung gestellt werden kann. Diese Berechnung wird im Gebirgsbereich von dort vorherrschenden ungünstigen Punktverbindungen beeinflusst.

- Eine genügende Anzahl von Bestimmungsgleichungen (21)

Die Anzahl von Bestimmungsgleichungen muß hoch genug sein, die Verhältnisse so zu beschreiben, daß auch die Ableitung von Lotabweichungen laut (12) sinnvoll ermöglicht wird (Lotabweichungsinterpolation). Im vorliegenden Fall haben Testrechnungen ergeben, daß mindestens 40 Punkte benötigt werden.

Nach der Bestimmung von q erlauben die Residuen an den Stützpunkten eine Beurteilung der Qualität des Polynomansatzes. Die örtliche Verteilung gleichartiger Residuen deutet auf systematische Abweichungen bei der Berechnung der Geoidhöhenunterschiede ΔN auf den Stützpunkten hin. Es werden Teilgebiete lokalisiert, in denen das gewählte Modell die Wirklichkeit nicht in vollem Umfang beschreiben kann.

Geoid-Lotabweichungen η_0 und ξ_0 lassen sich nach (12) jetzt auch als Ortsfunktion direkt aus dem Polynom für jeden beliebigen Ort innerhalb des Meßgebietes angeben, Einheit [rad]:

$$\begin{aligned}\eta_0(y,x) &= -\frac{\partial \Delta N(y,x)}{\partial y} = -\sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^{3-i} i q_{ij} \Delta y^{i-1} \Delta x^j \\ \xi_0(y,x) &= -\frac{\partial \Delta N(y,x)}{\partial x} = -\sum_{i=0}^3 \sum_{j=1}^{3-i} j q_{ij} \Delta y^i \Delta x^{j-1}\end{aligned}\quad (22)$$

Zur Ableitung der beobachtbaren Lotabweichungskomponenten η und ξ im Beobachtungsniveau W aus den Werten η_0 und ξ_0 am Geoid W_0 werden die Komponenten der Lotkrümmung $\delta\eta$ und $\delta\xi$ benötigt. Diese werden in zu (21) und (22) analoger Weise als Ortsfunktion eines Polynomansatzes für $\Delta E(y,x)$ modelliert. Ein Polynom 2. Grades beschreibt die orthometrische Korrektur ΔE im Meßgebiet mit einem mittleren Residuum von 0,012m.

In unproblematischen Meßgebieten wie z.B. dem Storebælt im Osten Dänemarks, siehe SCHÖDLBAUER/HEISTER/KRACK/SCHERER (1992), hat sich der einfache Polynomansatz jedoch bestens bewährt.

3.2 Strenge Ausgleichung im GAUSS-MARKOFF-Modell

Die strenge Ausgleichung aller Beobachtungen ist eine alternative Methode der lokalen Geoidbestimmung. In diesem Ansatz werden sämtliche Beobachtungen gemeinsam dazu verwendet, um in den Stützpunkten des Meßgebiets die Geoidhöhe N sowie Geoid-Lotabweichungen η_0 und ξ_0 zu bestimmen.

Diese anfangs unbekannten Größen werden als Parameter $\underline{\beta}$ des linearen GAUSS-MARKOFF-Modells aus der Gesamtheit der Beobachtungen \underline{y} geschätzt. Die Beobachtungen sind mit den unbekannten Parametern durch ein System von Beobachtungsgleichungen verbunden. In der vorliegenden Realisierung werden hierzu für die astro-geodätischen Beobachtungen die Pseudobeobachtungsgleichungen (23) eingeführt.

$$N_b - N_a = \Delta s \tan \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b}{2} \quad (23)$$

Nach KOCH (1980, Kapitel 321) liegt dann in Matrizenschreibweise folgender Ansatz zugrunde, wobei mit \underline{e} der Vektor der Verbesserungen (Residuen) der Beobachtungen \underline{y} bezeichnet wird:

$$\underline{X}\underline{\beta} = \underline{y} + \underline{e} \quad (24)$$

Die Gleichung (24) stellt das konsistente System der Geoidbestimmung dar. Sie besagt, daß die Parameter $\underline{\beta}$ bestmöglich durch die nur mit zufälligen Fehlern behafteten Beobachtungen des Sachverhaltes bestimmt werden sollen. \underline{X} ist dabei die Koeffizientenmatrix der linearisierten Beobachtungsgleichungen (JACOBY-Matrix).

Die unbekannten Parameter $\underline{\beta}$ werden im GAUSS-MARKOFF-Modell durch deren Schätzwerte $\hat{\underline{\beta}}$ nach (25) bestimmt:

$$\hat{\underline{\beta}} = (\underline{X}^T \underline{\Sigma}_{yy}^{-1} \underline{X})^{-1} \underline{X}^T \underline{\Sigma}_{yy}^{-1} \underline{y} \quad (25)$$

Die Kovarianzmatrix $\underline{\Sigma}_{yy}$ der Beobachtungen ergibt sich a-priori aus den in Abschnitt 2.3 dargelegten Genauigkeitsangaben.

Die Datumsfestlegung im Rahmen der Ausgleichung erfolgt durch Auffelderung (Minimierung der Restklaffungen) der gesuchten Parameter $\underline{\beta}$ auf die vorgegebenen ellipsoidischen Höhen h der Punkte des Grundnetzes und die Lotabweichungskomponenten der Punkte mit zuverlässigen astro-geodätischen Beobachtungen.

Gleichzeitig kann das zugrundeliegende GPS-Punktfeld auf Schwachstellen überprüft werden. Durch die Geoidhöhenunterschiede ΔN als Bindeglied sind auch die GPS-Beobachtungen mit den anderen terrestrischen Beobachtungen verknüpft. Die GPS-Höhenunterschiede Δh können ebenso in einer Ausgleichungsvariante als Unbekannte eingeführt werden und zusätzlich mitgeschätzt werden.

Durch die empirische Vorgabe der Kovarianzmatrix Σ_{yy} wird eine mit der Realität übereinstimmende Gewichtung der Beobachtungsverfahren untereinander erreicht. Die Qualität des gesamten Beobachtungsmaterials ist damit realistisch interpretiert. Die im vorliegenden Fall eingefügte Kovarianzmatrix wird durch das Ausgleichungsergebnis mit Hilfe der Standardabweichungen der Gewichtseinheit σ_0 gemäß (26) bestätigt.

$$\frac{\sigma_{0,a\text{-priori}}}{\sigma_{0,a\text{-posteriori}}} = 1,03 \quad (26)$$

Diese Qualitätsmerkmale der strengen Ausgleichung führen dazu, daß die Ergebnisse dieser Geoidbestimmung viel höher zu bewerten sind als diejenigen eines Polynomansatzes nach Abschnitt 3.1. Ein Polynomansatz ist weniger flexibel, die Residuen an den Stützstellen weisen die Modellfehler aus, die von Beobachtungsfehlern nicht trennbar sind. Im GAUSS-MARKOFF-Modell sind Verschiebungen an den Stützstellen Ausdruck von Inkonsistenzen im Beobachtungsmaterial.

Eine Realisierung der strengen Ausgleichung im GAUSS-MARKOFF-Modells stellt das Programmsystem *Helmert91*, siehe KELLER (1992), dar.

4 Anwendungen im Inntal-Netz

Das Inntal-Netz der Universität der Bundeswehr München (Abbildung 5) befindet sich südlich von Rosenheim. Es umfaßt ein Gebiet von ca 25km × 15km Ausdehnung in der Übergangszone zwischen der postglazialen Schotterebene und dem alpinen Hochgebirge. Zum Zweck der Überprüfung von Streckenmeßgeräten und GPS-Empfängern unterschiedlicher Typen unter Einsatzbedingungen wurden 8 Meßpfeiler in verschiedenen Höhenlagen zwischen 450m und 1800m mit durchschnittlichem Punktabstand von 10000m installiert, siehe z.B. SCHÖDLBAUER/GLASMACHER/KRACK (1987).

4.1 Beobachtungen im Inntal-Netz

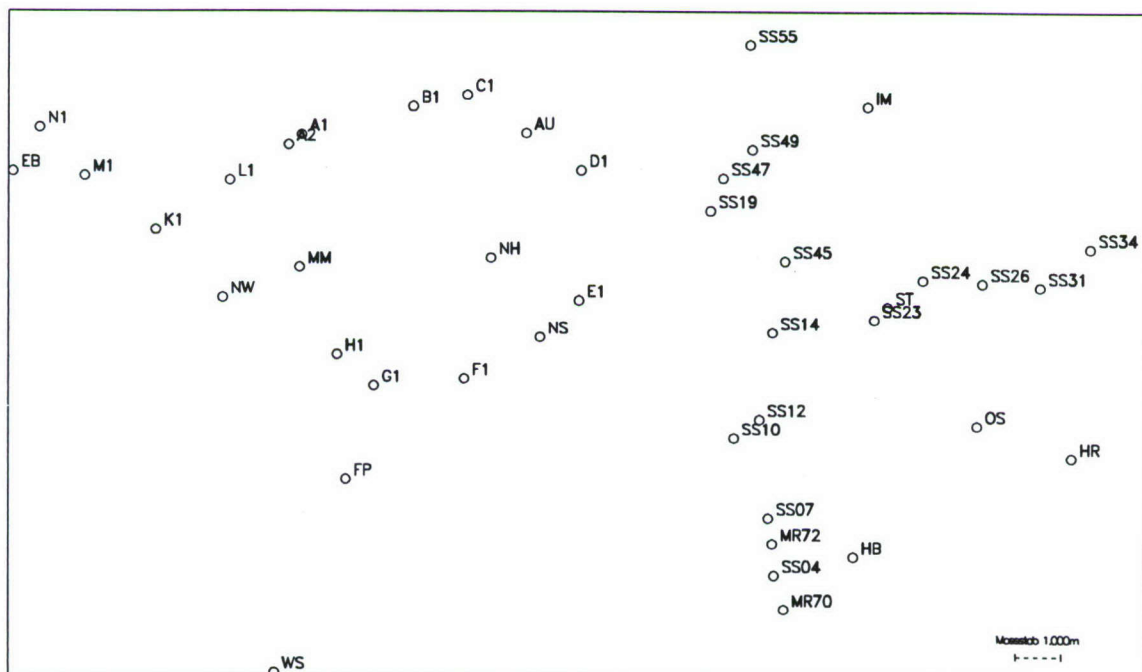


Abbildung 5

Seit Januar 1989 wird das Punktfeld im Inntal-Netz auf die Erfordernisse einer lokalen Geoidbestim-

mung abgestimmt. Zuerst erfolgte die Vermarkung von GPS-tauglichen Neupunkten in Form einer Schleife im Bereich der Schotterebene westlich des Inns mit Punktabständen $\Delta s \sim 1500\text{m}$. In den Jahren 1995 und 1997 wurde auch der östliche Teil des Inntal-Netzes im Rahmen von Diplomarbeiten durch Neupunkte verdichtet. Inzwischen wurde die Punktzahl durch Verdichtungsmessungen derart erhöht, daß 117 Stützpunkte für eine lokale Geoidbestimmung zur Verfügung stehen. Aufgrund der topografischen Gegebenheiten sind die Punkte nicht gleichmäßig verteilt.

Die Beobachtungen im Inntal-Netz wurden stets unterstützt durch das Bayerische Landesvermessungsamt München (BLVA). Folgende Beobachtungen liegen vor:

① GPS-Beobachtungen	Punkte: 122
② Nivellementbeobachtungen (Anschluß an das DHHN, Linien I./II. Ordnung BLVA)	Punkte: 117
③ Astro-geodätische Beobachtungen	Punkte: 43
④ Schwerebeobachtungen (durch das BLVA)	Punkte: 23

In Abbildung 5 wird die Punktkonstellation des Inntal-Netzes dargestellt. Es sind dabei nur die 43 Punkte berücksichtigt, auf denen eine redundante lokale Geoidbestimmung nach (1) und (4) möglich ist.

Das GPS-Netz liegt durch Anschluß an B- und C-Netz-Punkte des DREF (EB, HR) im Datum ETRS89 vor und erfüllt dabei nach WOLF (1981) die Voraussetzungen zur Definition absoluter Lotabweichungen η und ξ . Im Rahmen der Geoidbestimmung aus Lotabweichungen wurden Komponenten η in der Regel nicht nach (2) über Längenvergleich, sondern nach (25) über einen Vergleich korrespondierender Azimute entsprechend der LAPLACESchen Azimutgleichung nach TORGE (1975, Gleichung 5.8a) ermittelt:

$$\eta = \frac{\alpha - A - \xi \sin A \cot B}{\tan B - \cos A \cot B} \approx (\alpha - A) \cot B \quad (27)$$

Diese Vorgehensweise erfordert das Vorhandensein eines Fernziels, genannt "Mire", als Referenz für das astro-geodätische Azimut α und das ellipsoidische Azimut A (sowie für die ellipsoidische Zenitdistanz z). Eine Mire muß Bestandteil des GPS-Netzes sein. Als Mire kommen in der Regel hochgelegene, weithin sichtbare Punkte des Inntal-Netzes in Frage, damit sich der logistische Aufwand durch Mehrnutzung in Grenzen hält. Zielweiten von $> 4000\text{m}$ garantieren dabei, daß Lagefehler und eventuelle Aufstellfehler von $\pm 0,01\text{m}$ die Richtungsbestimmung praktisch nicht verfälschen können. Während der Dauer der astro-geodätischen Beobachtungen müssen die Miren z.B. durch Blinkleuchten signalisiert werden.

Azimute α lassen sich einfach durch satzweise Horizontalwinkelmessungen zwischen der Mire und dem Polarstern nach SIGL (1975, Kapitel 16.2) und SCHERER (1998) beobachten. Polarisbeobachtungen haben den Vorteil, daß sie zeitunkritisch sind und mit den heute zur Verfügung stehenden Theodoliten sowie durch die Kenntnis der genauen Einstelldaten unter Verwendung der GPS-Ergebnisse auch tagsüber durchgeführt werden können. Eine besondere Signalisierung der Mire, die je nach Punktlage einen erheblichen Aufwand darstellen kann, entfällt dadurch.

Werden auf einem Punkt sowohl astro-geodätische Azimute α als auch astro-geodätische Längen λ beobachtet, kann die Erfüllung der LAPLACESchen Azimutgleichung überprüft werden.

$$(\alpha - A) - (\varphi - B) \sin A \cot B - (\lambda - L) (\sin B - \cos B \cos A \cot B) = 0 \quad (28)$$

4.2 Koordinatendarstellung

Die flächenhafte Geoiddarstellung benötigt Informationen über die Lage eines Punktes im Meßgebiet. Zu diesem Zweck eignen sich sowohl die bereits automatisch aus der GPS-Auswertung resultierenden geografischen Koordinaten B und L als auch daraus abgeleitete konforme Koordinaten y und x . Die Umrechnung zwischen diesen beiden Systemen von Flächenkoordinaten kann man z.B. SCHÖDLBAUER (1993a) entnehmen.

Im folgenden werden konforme Koordinaten y und x verwendet. Diese besitzen folgende Spezifikationen:

- ❶ Bezugsellipsoid WGS84, Datum ETRS89 (abgeleitet aus GPS-Punktnetz)
- ❷ Bezugsmeridian L_0 mit $y_0 = 500000,000\text{m}$ verläuft durch Bezugspunkt P_0
- ❸ Maßstabsfaktor am Bezugsmeridian $m_0 = 1,000000$
- ❹ Bezug für x -Koordinate ist der Äquator mit $B_0 = 0^\circ 00' 00,0000''$
- ❺ Bezugspunkt P_0 der Polynomentwicklung ist Punkt EB (zugleich auch B-Netz-Punkt des BLVA)

4.3 Lokale Geoidbestimmung im Polynomansatz 3. Grades

Die Polynomentwicklung, ausgehend von Bezugspunkt EB, soll den Ausführungen gemäß aufgrund von (1) durch einen Höhenvergleich bewerkstelligt werden. Dazu sind folgende Beobachtungen notwendig:

- ▶ ellipsoidische Höhenunterschiede Δh
 - ▶ direkt aus GPS-Punktnetz
- ▶ nivellierte Höhenunterschiede Δn
 - ▶ Anschluß der GPS-Punkte an die im Meßgebiet verlaufenden Nivellementslinien I. und II. Ordnung des BLVA
- ▶ orthometrische Korrekturen ΔE
 - ▶ für jeden einzelnen Linienabschnitt aus den nach der Interpolation (17) überall verfügbaren Schwerewerten g
 - ▶ Linien ausgehend von Bezugspunkt EB zusammensetzen

Unter diesen Voraussetzungen wird für das lokale Geoid im Inntal-Netz folgende Ortsfunktion $\Delta N(y,x)$ ausgehend von Bezugspunkt EB ($=P_0$) in der Einheit [m] angegeben:

$$\begin{aligned} \Delta N(y,x) = & 0,020 \text{ [m]} \\ & - 4,881 \cdot 10^{-5} \Delta y - 8,009 \cdot 10^{-5} \Delta x \\ & + 2,787 \cdot 10^{-9} \Delta y^2 + 4,305 \cdot 10^{-9} \Delta y \Delta x + 2,099 \cdot 10^{-9} \Delta x^2 \\ & - 4,742 \cdot 10^{-14} \Delta y^3 - 1,508 \cdot 10^{-13} \Delta y^2 \Delta x - 3,478 \cdot 10^{-14} \Delta y \Delta x^2 + 6,185 \cdot 10^{-14} \Delta x^3 \end{aligned} \quad (29)$$

Ein Höhenlinienplot dieser Funktion ergibt das in Abbildung 6 dargestellte regelmäßige Bild. Die Äquidistanz der Höhenlinien beträgt 0,05m. Die nördlichste Höhenlinie besitzt dabei den Wert $-0,30\text{m}$, die südlichste den Wert $+0,60\text{m}$. Die Geoidfläche steigt also im Meßgebiet nach Süden hin gegenüber der Fläche des Bezugsellipsoids um ca 1m an, der Verlauf des Inntals ist erkennbar.

Als Standardabweichung dieser Polynomentwicklung ergibt sich $\sigma_0 = 0,015\text{m}$. Die theoretisch erreichbare Genauigkeit wurde in Abschnitt 2.4 mit $\sigma(\Delta N) \sim 0,005\text{m}$ weit günstiger abgeschätzt. Der Unterschied zwischen $\sigma(\Delta N)$ und σ_0 resultiert aus dem Modellfehler des Polynomansatzes.

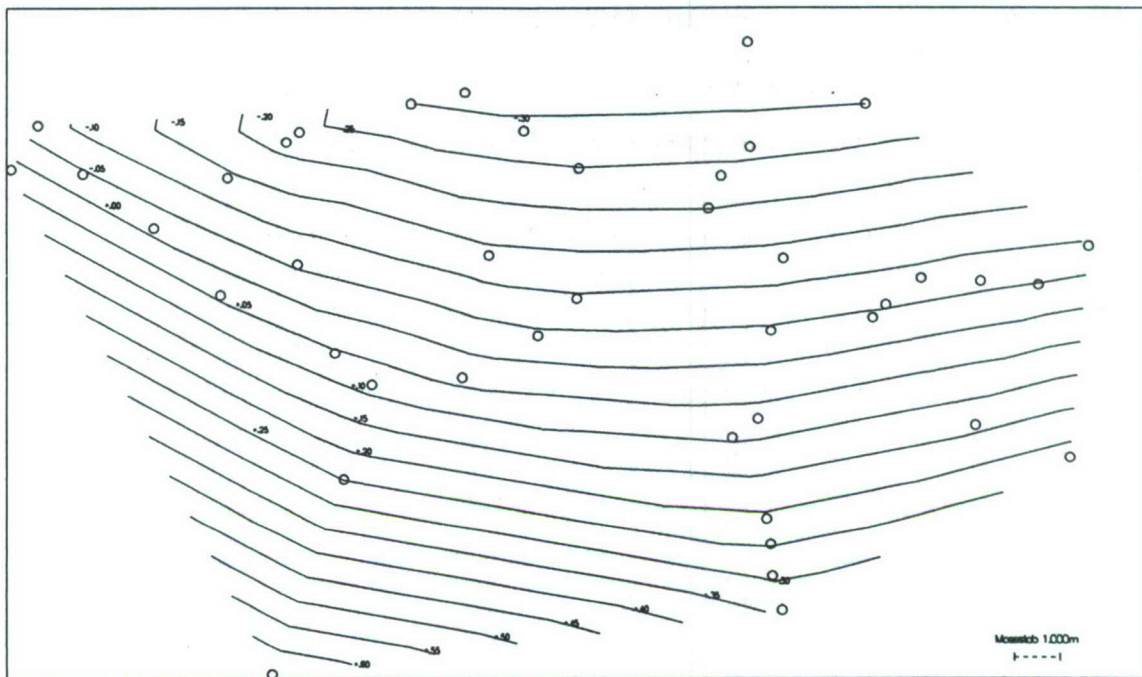
- ▶ Einführung von Gewichten:

Durch die Einführung von Gewichten könnte man das Polynom zwingen, sich in Bereichen großer Residuen den Stützwerten besser anzupassen, z.B. im Gebirgsbereich. Dabei muß eine Erhöhung der Standardabweichung in Kauf genommen werden. In der Regel genügen die Stützwerte ΔN auf diesen Punkten dem durch das höhere Gewicht suggerierten Genauigkeitsanspruch aber nicht, so daß sich eine unerwünschte Rückkopplung mit dem gesicherten Datenmaterial anderer Bereiche ergibt. Von einer speziell gewichteten Polynomentwicklung ist daher ohne eine grundlegende Analyse des Beobachtungsmaterials sowie ohne eine gleichzeitige Optimierung der Punktkonstellation zunächst abzusehen.

- ▶ Kompatibilität mit den beobachteten Lotabweichungen:

Mit den nun bekannten Koeffizienten q aus (29) läßt sich das Feld der Lotabweichungen η_0 und ξ_0 nach (22) ebenfalls durch Ortsfunktionen angeben. Die mittlere Geoid-Lotabweichung ε_{m0} in der Verbindung zweier Punkte im Azimut A berechnet sich aus (11), mit (13) und (10) ergibt sich ein interpolierter Wert

für die Oberflächen-Lotabweichung ε_m . Die Genauigkeit dieser Angabe ist von der Zuverlässigkeit des Polynomansatzes abhängig.



- ▶ GPS-Höhen h Anzahl 43
- ▶ orthometrische Höhenunterschiede ΔH Anzahl 52
- ▶ astro-geodätische Lotrichtungparameter φ [66] und λ [17] Anzahl 83
- ▶ astro-geodätische Azimute α Anzahl 52
- ▶ Korrelationsbedingungen analog (8) Anzahl 62

Aus diesen 292 Beobachtungen y wurden folgende 172 zunächst unbekannte Parameter über das GAUSS-MARKOFF-Modell bestimmt:

- ▶ Geoid-Lotabweichungen η_0 Anzahl 43
- ▶ Geoid-Lotabweichungen ξ_0 Anzahl 43
- ▶ Geoidhöhen N Anzahl 43
- ▶ ellipsoidische Höhen h Anzahl 43

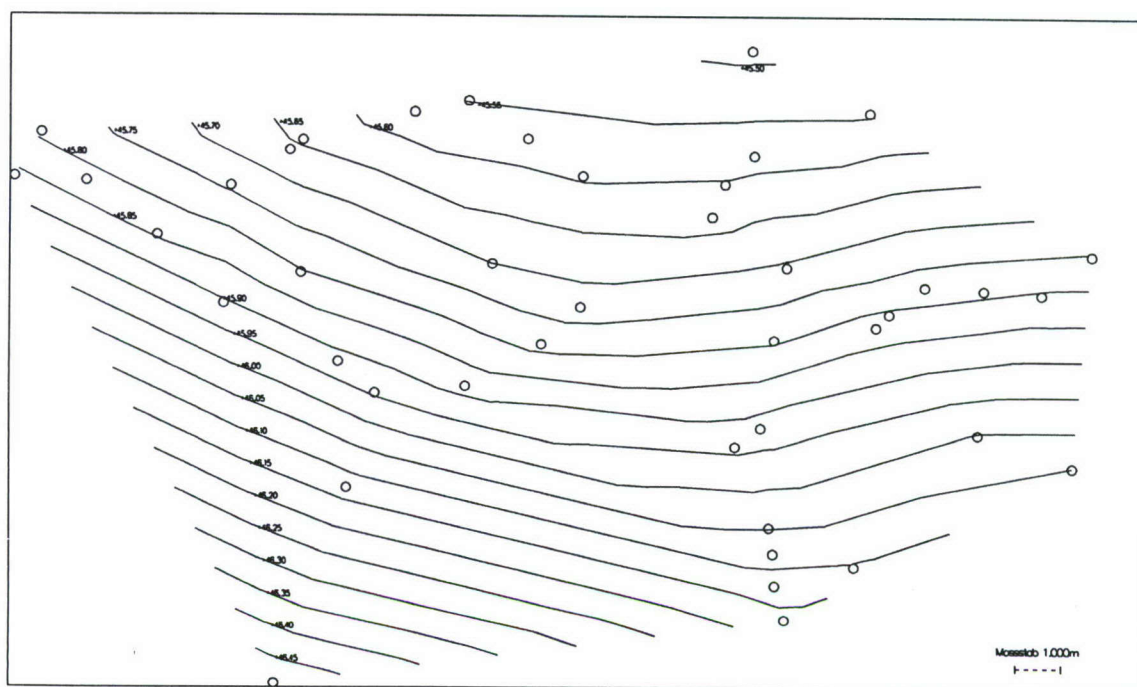


Abbildung 7

Die Überprüfung im Rahmen der gemeinsamen Ausgleichung ergibt für die GPS-Beobachtungen im Mittel Verbesserungen von 0,0049m. Dieser Wert wurde bereits theoretisch prognostiziert. Im Polynomansatz kann dieser Tatsache keine Rechnung getragen werden, dort gelten die GPS-Beobachtungen als fehlerfrei.

Abbildung 7 zeigt die resultierende Geoidfläche als Höhenlinienplot, dessen Höhenlinien mittels einer DELAUNAY-Dreiecksvermaschung linear interpoliert wurden. Die Äquidistanz beträgt auch hier 0,05m. Die nördlichste Höhenlinie besitzt den Wert +45,50m, die südlichste den Wert +46,45m, so daß die Tendenz, die im Ergebnis des Polynomansatzes zum Ausdruck gekommen ist, bestätigt wird. Gegenüber der Darstellung in Abbildung 6 ist hier allerdings ein individueller Höhenlinienverlauf erkennbar, der sich besser an die vorgefundene topografische Situation anpaßt.

Das Ausgleichungsergebnis zeigt, daß die lokale Geoidbestimmung über den reinen Höhenvergleich gegenüber derjenigen aus Lotabweichungen um den Faktor 2 zuverlässiger ist. Dies entspricht auch den theoretischen Vorüberlegungen. Die Gleichung (8), die die Resultate beider Verfahren gleichsetzt, wird im Mittel auf 0,005m genau erfüllt, bei einer maximalen Abweichung von 0,020m auf einer ausgewählten ungünstigen Punktverbindung. Der Mittelwert entspricht dabei wiederum der Genauigkeit der GPS-Höhenbestimmung und bestätigt die Aussage, daß die lokale Geoidbestimmung durch Höhenvergleich von der Genauigkeit der GPS-Beobachtungen begrenzt wird.

In einer weiteren Rechenvariante wurde mit *Helmert91* die Ausgleichung im Niveau W_1 , mit der die Einflüsse der Dichtehypothese herabgesetzt werden sollen, siehe Kapitel 2.4, durchgeführt. Die Niveaufläche wurde mit $W_1 = 440\text{m}$ auf das Niveau des niedrigsten Punktes des Inntal-Netzes festgesetzt. Erreichte die Geoidbestimmung (Niveau W_0) eine Genauigkeit von $0,005\text{m}$, so konnte durch den Bezug auf W_1 eine geringe Verbesserung auf $0,004\text{m}$ verzeichnet werden. Wie bereits oben erläutert, ist die unbekannte Dichteverteilung bei lokalen Geoidbestimmungen unkritisch.

4.5 Vergleich zwischen den lokalen Geoidbestimmungen

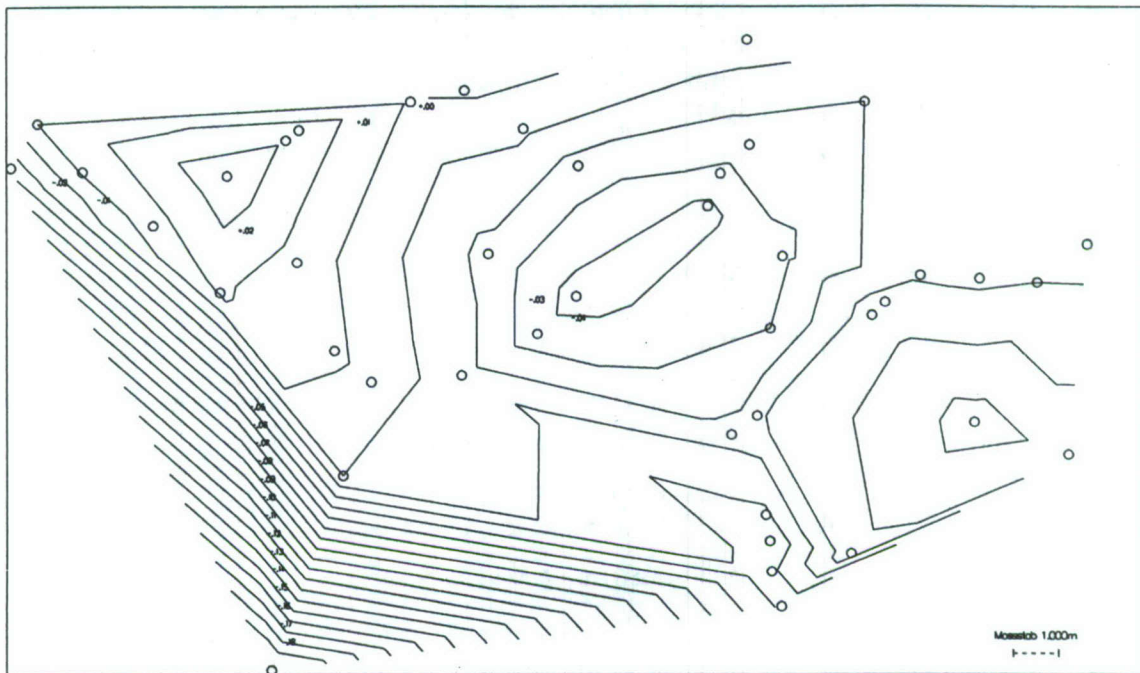


Abbildung 8

Die Ergebnisse können unmittelbar nicht miteinander verglichen werden. Der Polynomansatz beinhaltet nur eine lokale Geoidbestimmung über den Höhenvergleich, wobei die GPS-Beobachtungen als fehlerfrei angesehen werden. Im GAUSS-MARKOFF-Modell ist ein konsistentes System aus Beobachtungen und geoidbezogenen Parametern entstanden, wozu auch die astro-geodätische Geoidbestimmung beigetragen hat.

Ein direkter Vergleich zeigt diejenigen Netzteile auf, in denen das Polynommodell die Situation nicht mit der genügenden Genauigkeit approximieren kann bzw. in denen sich die Fehler in den grundlegenden Beobachtungen auf die Geoidbestimmung im Polynomansatz ausgewirkt haben. Diese Probleme überlagern sich gegenseitig und sind im Polynomansatz nicht voneinander trennbar.

In Abbildung 8 ist der Unterschied $\Delta N_{H91} - \Delta N_{\text{Polynom}}$ mit einer Äquidistanz von $0,01\text{m}$ als Höhenlinienplot grafisch dargestellt. Es lassen sich dabei drei Inseln ausmachen, in denen die Geoidfläche nicht mit einem Polynom 3. Grades für das gesamte Inntal-Netz beschrieben werden kann. Die Übereinstimmung der beiden Ansätze beträgt hier nur $\pm 0,04\text{m}$. Im Mittel ist eine Abweichung von $0,016\text{m}$ zu verzeichnen.

Ein Spezialfall ist die Bestimmung der Geoidhöhe für den Wendelstein (WS). In diesem Punkt weichen beide lokale Geoidbestimmungen um $\pm 0,1\text{m}$ voneinander ab. Diese Abweichung stammt im wesentlichen aus dem Polynomansatz. Der Wert aus dem Polynomansatz ist insofern fragwürdig, weil sich der Punkt am Netzrand befindet und damit im Prinzip nicht über eine Inter- sondern eine Extrapolation bestimmt ist. Allerdings ist der Fehler überlagert von der astro-geodätischen Geoidbestimmung im Programm *Helmert91*. Der Punkt WS kann nur unter Verwendung ungünstiger Punktverbindungen in das

Punktfeld integriert werden. Aus diesem Grund macht sich der Modellfehler (5) bemerkbar.

Die generelle Tauglichkeit von Polynomen 3. Grades für die Approximation der Geoidfläche im Inntal-Netz läßt sich überprüfen, indem man für die Berechnung der Funktionswerte $\Delta N(y,x)$ an den Stützpunkten nämlich statt der Originalbeobachtungen, die mit Fehlern behaftet sind, nun die verbesserten Beobachtungen aus der Ausgleichung verwendet. Die Unterschiede der Geoidhöhen an den Stützpunkten sind dann nur noch von konzeptioneller Natur, Beobachtungsfehler sind eliminiert. Im vorliegenden Fall führt diese Vorgehensweise zu einer Verbesserung der mittleren Übereinstimmung auf 0,012m, wobei die Darstellung in Abbildung 8 weitgehend erhalten bleibt. Dieser Wert beschreibt das lokale Approximationspotential eines Polynomansatzes 3. Grades unter den Voraussetzungen des Inntal-Netzes.

Die Ausgleichungsergebnisse geben den lokalen Geoidverlauf punktweise wieder. Eine flächenhafte Darstellung muß durch eine Interpolationsvorschrift realisiert werden. Um einen Vergleich mit dem direkten Polynomansatz von (1) zu ermöglichen, soll diese Interpolationsvorschrift ein Polynom 3. Grades sein, das im Meßgebiet die Restklaffungen der ausgeglichenen Geoidhöhen N nach der Methode der kleinsten Quadrate minimiert. Es ergibt sich die analog (29) definierte Interpolationsfunktion (30), ausgehend von Bezugspunkt EB ($=P_0$) in der Einheit [m]:

$$\begin{aligned}\Delta N(y,x) = & 0,012 \text{ [m]} \\ & - 4,661 \cdot 10^{-5} \Delta y - 7,408 \cdot 10^{-5} \Delta x \\ & + 2,408 \cdot 10^{-9} \Delta y^2 + 3,711 \cdot 10^{-9} \Delta y \Delta x + 3,271 \cdot 10^{-9} \Delta x^2 \\ & - 3,400 \cdot 10^{-14} \Delta y^3 - 1,308 \cdot 10^{-13} \Delta y^2 \Delta x - 8,147 \cdot 10^{-14} \Delta y \Delta x^2 + 1,177 \cdot 10^{-13} \Delta x^3\end{aligned}\quad (30)$$

Wie für die direkte Polynomdarstellung (29) ergibt sich auch hier als Standardabweichung der Gewichtseinheit $\sigma_0 = 0,016\text{m}$ als Maß für die lokale Anpassungsfähigkeit eines Polynoms 3. Grades.

Geoidhöhen N ergeben sich für jeden Punkt mit Hilfe der ausgeglichenen Geoidhöhe N_0 des Bezugspunktes P_0 und dem interpolierten Geoidhöhenunterschied $\Delta N(y,x)$ zu

$$N = 45,861\text{m} + \Delta N(y,x) \quad (31)$$

Die Ausgleichungsergebnisse für die Stützpunkte sind in einer Tabelle im Abschluß an das Literaturverzeichnis veröffentlicht. Die Tabelle enthält sämtliche Zahlenwerte sowohl im geometrischen als auch im physikalischen Höhensystem.

4.6 Vergleich mit großräumigen Geoidbestimmungen

Die Ergebnisse der speziell für das Inntal-Netz berechneten lokalen Geoidbestimmung lassen sich teilweise online im Internet verfügbaren Daten großräumiger Entwicklungen wie z.B. DENKER/BEHREND/TORGE (1995), IFE (1997) und IFAG/BKG (1998) gegenüberstellen.

Das Quasigeoid EGG97 nach DENKER steht als CD-ROM mit zugehörigen Interpolationsprogrammen zur Verfügung und berechnet in Abhängigkeit von Lagekoordinaten die zugehörigen Quasigeoidhöhen ζ . Als Quasigeoidhöhenunterschiede $\Delta\zeta$ zwischen zwei Punkten lassen sie sich mit den entsprechenden Geoidhöhenunterschieden ΔN als Ergebnis des GAUSS-MARKOFF-Modells vergleichen.

Der Vergleich zwischen $\Delta\zeta$ und ΔN ergibt im Mittel einen Unterschied von 0,026m. Insbesondere auf den Gebirgspunkten sind größere Werte bis zu 0,149m (Wendelstein) zu verzeichnen. Hier reicht die Datenbasis des großräumigen Quasigeoids nicht aus, die lokale Feinstruktur mit Zentimetergenauigkeit zu erfassen. Die Auflösung dieser hochfrequenten Feldanteile wird im wesentlichen durch die Verwendung eines digitalen Geländemodells mit der Gitterweite $1' \times 1,5'$ ermöglicht.

Dennoch ist die Übereinstimmung als überaus gut einzustufen, wenn man die besonderen Verhältnisse des Inntal-Netzes am Alpenrand bedenkt.

5 Literatur

- AMILGEO (Amt für militärisches Geowesen): *World Geodetic System 1984*.
Defense Mapping Agency Technical Report 8350.2
Euskirchen, 1988
- DECKER, W.: *Geoidbestimmung*.
Mitteilungsblatt DVW Baden-Württemberg, 45. Jahrgang, Heft 1/1998, Seite 125-140
Stuttgart, 1998, ISSN 0940-2942
- DENKER, H.: *Stand und Aussichten der Geoidmodellierung in Europa*.
Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), 121. Jahrgang, Heft 6/1996, Seite 264-277
Stuttgart, 1996, ISSN 0340-4560
- DENKER, H./BEHREND, D./TORGE, W.: *The European Gravimetric Quasigeoid EGG96*.
IGeS Bulletin No 4, "New Geoids in the World", Seite 3-11
Toulouse/Milano, 1995
- GURTNER, W.: *Das Geoid in der Schweiz*.
Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 32
Schweizerische Geodätische Kommission (SGK), Zürich, 1978
- HEISKANEN, W.A./MORITZ, H.: *Physical Geodesy*.
W.H. Freeman and Company, San Francisco/London, 1967
- HELMERT, F.R.: *Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie*. Band 2
Verlag B.G. Teubner, Leipzig, 1884
unveränderter Nachdruck Minerva GmbH, Frankfurt am Main, 1962
- IFAG/BKG: *GPS Informations- und Beobachtungssystem GIBS*. Geoidhöhenberechnung online
World Wide Web <<http://gibs.leipzig.ifag.de/cgi-bin/geoid.cgi?de>>
Bundesamt für Kartografie und Geodäsie, Leipzig, 1998
- IFE: *The European Gravimetric Geoid/Quasigeoid EGG97*.
CD-ROM, Institut für Erdmessung der Universität Hannover
World Wide Web <<http://www.ife.uni-hannover.de/>>
Hannover, 1997
- IGP: *Bedienungsanleitung für ICARUS on-line*.
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich
World Wide Web <http://www.geod.ethz.ch/p05/start_p05.html>
Zürich, 1988
- KELLER, W.: *Strenge Ausgleichung hybrider Messungen*.
IV. Internationales FIG-Symposium über Deformationsmessungen, Hannover 24.-28.02.1992
Hannover, 1992
- KOCH, K.R.: *Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen*.
Dümmler-Verlag, Bonn, 1980, ISBN 3-427-78921-7
- SCHERER, B.: *Vertiefte Informationen Geodätische Astronomie*.
World Wide Web <<http://habicht.bauw.unibw-muenchen.de/info/Astro/info.html>>
Neubiberg, 1998
- SCHÖDLBAUER, A.: *Bezugssysteme und Koordinatentransformationen für geodätische und navigatorische Arbeiten mit dem Global Positioning System*.
Schriftenreihe Institut für Geodäsie
Universität der Bundeswehr München, Heft 45, Seite 161-184
Neubiberg, 1993a, ISSN 0173-1009

- SCHÖDLBAUER, A.: *Höhenbestimmung mit dem Global Positioning System*
Schriftenreihe Institut für Geodäsie
Universität der Bundeswehr München, Heft 45, Seite 231-263
Neubiberg, 1993b, ISSN 0173-1009
- SCHÖDLBAUER, A./GLASMACHER, H./KRACK, K.: *Vergleichsmessungen im Global Positioning System mit verschiedenen Empfängertypen.*
Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), 94. Jahrgang, Heft 8-9/1987, Seite 340-345
Karlsruhe, 1987, ISSN 0002-5968
- SCHÖDLBAUER, A./HEISTER, H./KRACK, K./SCHERER, B.: *Höhenübertragung über den Großen Belt (östlicher Kanal) unter Nutzung des Global Positioning System (GPS) in Verbindung mit lokalen Nivellements, Messungen von Zenitdistanzen und astronomischen Azimut- und Breitenbestimmungen (GPS-Nivellement).*
In: MATTHIAS, H.J./GRÜN, A.: *Ingenieurvermessung* 92. Band 2
XI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich, 21.-26.09.1992, Seite IV 1/1-1/14
Dümmler Verlag, Bonn, 1992, ISBN 3-427-78161-5
- SEEBER, G./TORGE, W.: *Zum Einsatz transportabler Zenitkameras für die Lotabweichung.*
Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), 110. Jahrgang, Heft 10/1985, Seite 439-450
Stuttgart, 1985, ISSN 0340-4560
- SEEBER, G./TORGE, W.: *Eine GPS/Geoid-Höhenübertragung zum Meerespegel in Helgoland.*
Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), 122. Jahrgang, Heft 10/1997, Seite 445-457
Stuttgart, 1997, ISSN 0340-4560
- SIGL, R.: *Geodätische Astronomie.*
Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1975, ISBN 3-87907-041-5
- TORGE, W.: *Geodäsie.*
Sammlung Götschen 2163, Walter de Gruyter & Co., Berlin, 1975, ISBN 3-11-004394-7
- WEBER, D./SCHELLEIN, H.: *Möglichkeiten und Grenzen der Höhenbestimmung aus GPS-Messungen.*
Mitteilungsblatt DVW Bayern, 38. Jahrgang, Heft 4/1986, Seite 409-423
München, 1986, ISSN 0723-6336
- WEBER, D./SCHELLEIN, H.: *Kann das Präzisionsnivellement noch verbessert werden?*
Mitteilungsblatt DVW Bayern, 39. Jahrgang, Heft 4/1987, Seite 359-373
München, 1987, ISSN 0723-6336
- WOLF, H.: *Der Lotabweichungs-Begriff in der Geodäsie.*
Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe E, Heft 19, Seite 16-32
München, 1981, ISBN 3-7696-9664-6

6 Zahlenwerte

Pkt	B	L	h [m]	H [m]	g [m/s ²]	η_0 ["]	ξ_0 ["]	η ["]	ξ ["]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EB	47°48'17,3471"	11°56'18,6624"	744,706	698,845	9,80622398	+4,82	+10,68	+5,52	+11,54
N1	47°48'48,6846"	11°56'46,7843"	621,483	575,693	9,80647724	+8,80	+12,00	+9,48	+12,87
M1	47°48'14,4192"	11°57'33,8502"	595,704	549,885	9,80653878	+6,52	+11,05	+7,14	+11,92
K1	47°47'36,0635"	11°58'48,0504"	543,028	497,184	9,80662049	+4,23	+11,31	+4,78	+12,20
L1	47°48'11,1182"	12°00'05,7863"	523,516	477,774	9,80667146	+8,27	+9,22	+8,73	+10,12
A2	47°48'36,4055"	12°01'07,7764"	515,871	470,210	9,80667080	+8,05	+7,46	+8,46	+8,37
A1	47°48'43,6118"	12°01'21,7144"	515,446	469,804	9,80667205	+7,31	+7,87	+7,71	+8,78
B1	47°49'03,7482"	12°03'20,0388"	510,772	465,208	9,80667681	+2,59	+5,37	+2,86	+6,29
C1	47°49'11,8955"	12°04'17,3549"	515,962	470,413	9,80666808	-0,18	+6,92	+0,04	+7,86
AU	47°48'44,5193"	12°05'19,8576"	515,891	470,319	9,80665274	+3,25	+8,74	+3,41	+9,68
D1	47°48'17,8715"	12°06'18,2599"	504,911	459,317	9,80665407	+3,98	+10,24	+4,07	+11,19
E1	47°46'45,0237"	12°06'15,7635"	505,985	460,260	9,80659658	+5,28	+7,54	+5,37	+8,49
F1	47°45'48,6840"	12°04'13,7635"	522,507	476,636	9,80653190	+4,54	+15,18	+4,73	+16,11
G1	47°45'43,7923"	12°02'37,9318"	535,733	489,790	9,80652805	+6,45	+16,97	+6,75	+17,89
H1	47°46'06,0656"	12°01'59,0351"	550,969	505,052	9,80651160	+7,56	+14,28	+7,90	+15,19
MM	47°47'09,4016"	12°01'19,5450"	527,638	481,833	9,80658324	+7,99	+15,23	+8,38	+16,14
NW	47°46'47,6224"	11°59'58,2920"	546,054	500,148	9,80656819	+5,53	+15,09	+5,99	+15,99
NS	47°46'18,4580"	12°05'34,2987"	510,918	465,133	9,80657295	+6,93	+10,35	+7,05	+11,29
NH	47°47'15,7162"	12°04'42,2586"	514,022	468,322	9,80657169	-2,15	+10,99	-1,98	+11,93
FP	47°44'35,9858"	12°02'08,0837"	1.320,559	1.274,431	9,80479374	+4,73	+18,11	+5,04	+19,03
WS	47°42'16,2152"	12°00'52,2411"	1.847,107	1.800,614	9,80360792	+3,06	+14,92	+3,43	+15,83
IM	47°49'03,0518"	12°11'21,9809"	548,242	502,697	9,80666486	-1,06	+12,26	-1,27	+13,25
ST	47°46'39,7816"	12°11'42,7171"	854,968	809,163	9,80592346	-0,75	+12,55	-1,01	+13,55
HR	47°44'50,2127"	12°14'55,2885"	1.613,602	1.567,552	9,80422977	-5,68	+14,50	-6,14	+15,53
HB	47°43'39,2185"	12°11'05,8296"	1.410,199	1.364,094	9,80474360	-3,64	+15,78	-3,88	+16,78
SS04	47°43'25,8285"	12°09'42,0461"	578,243	532,120	9,80637520	-1,31	+12,81	-1,46	+13,80
SS07	47°44'07,2546"	12°09'36,1292"	531,411	485,362	9,80647130	-4,45	+9,60	-4,59	+10,58
SS10	47°45'05,2313"	12°08'59,8950"	507,921	461,981	9,80653280	-3,57	+11,05	-3,67	+12,03
SS12	47°45'18,7058"	12°09'27,1212"	570,911	524,988	9,80641540	-3,84	+14,39	-3,96	+15,37
SS14	47°46'21,4363"	12°09'41,1843"	576,672	530,878	9,80643930	-8,27	+14,77	-8,40	+15,75
SS19	47°47'48,9505"	12°08'35,6464"	496,182	450,553	9,80665625	-1,56	+8,00	-1,61	+8,97
SS23	47°46'30,4150"	12°11'28,7782"	836,878	791,055	9,80593700	-1,16	+10,88	-1,40	+11,88
SS24	47°46'58,8770"	12°12'20,0154"	803,492	757,716	9,80602560	-1,08	+12,44	-1,37	+13,45
SS26	47°46'56,5218"	12°13'22,5074"	718,473	672,683	9,80619360	-1,67	+12,24	-2,02	+13,26
SS31	47°46'53,5398"	12°14'23,1048"	724,990	679,183	9,80618150	-2,40	+12,61	-2,81	+13,63
SS34	47°47'21,2261"	12°15'15,6418"	661,903	616,149	9,80633050	-0,55	+15,74	-1,01	+16,77
SS45	47°47'12,9707"	12°09'54,6339"	527,460	481,753	9,80663336	-6,95	+10,14	-7,09	+11,12
SS47	47°48'12,0680"	12°08'49,1351"	495,540	449,936	9,80669520	-1,79	+8,64	-1,85	+9,61
SS49	47°48'32,4999"	12°09'19,9784"	494,942	449,361	9,80671940	+0,79	+8,54	+0,70	+9,52
SS55	47°49'47,5007"	12°09'17,7628"	492,822	447,333	9,80628070	+1,58	+7,50	+1,51	+8,48
MR70	47°43'01,3307"	12°09'52,2646"	521,811	475,643	9,80648730	-2,28	+11,23	-2,46	+12,21
MR72	47°43'48,5705"	12°09'40,3763"	534,545	488,465	9,80646260	-7,67	+12,19	-7,82	+13,17
OS	47°45'13,6231"	12°13'16,3940"	828,166	782,163	9,80591760	-5,58	+15,77	-5,95	+16,79

GLOBALE SCHWEREFELDBESTIMMUNG AUS SATELLITENBAHNSTÖRUNGEN: STATUS, ANWENDUNG UND ENTWICKLUNGSMÖGLICHKEITEN MIT DER CHAMP-SATELLITENMISSION

Dr.-Ing. Peter Schwintzer

GeoForschungsZentrum Potsdam
Aufgabenbereich 1 'Kinematik und Dynamik der Erde'
Telegrafenberg A 17
14473 Potsdam

Zusammenfassung

Globale Modelle des äußeren Erdschwerefelds werden, was die großräumigen Strukturen betrifft, aus gravitativen Bahnstörungen erdumkreisender Satelliten abgeleitet. In das aktuellste am GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) in Kooperation mit 'Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale' (GRGS), Toulouse, berechnete globale Schwerefeldmodell GRIM4-S4 sind Bahnbeobachtungen von 34 Satelliten mit Flughöhen zwischen 800km und 20000km eingeflossen. Auflösung und Genauigkeit globaler Schwerefeldmodelle werden begrenzt durch die mit der Flughöhe abnehmende Sensitivität und durch mangelnde Beobachtungsüberdeckung bodengestützter Satellitentrackingverfahren. GRIM4-S4 hat eine räumliche Auflösung an der Erdoberfläche von ca. 500km bei einer Genauigkeit von 1m im Geoid und 5mgal in der Schwere.

Neben Anwendungen in der Geodäsie, wo die Grobstruktur des Schwerefelds die Grundlage für die höherauflösende Detailmodellierung aus Altimetrie und Gravimetrie bildet, haben Schwerefeldmodelle große Bedeutung in der Geophysik bei der Interpretation für Modelle über Aufbau und Dynamik des Erdkörpers und in der Ozeanographie, wo das Geoid als Referenzfläche für die Bestimmung der Meerestopographie aus Satellitenaltimetrie genutzt wird. Aus der Meerestopographie lassen sich direkt die absoluten geostrophischen Meeresströmungen ableiten, die Eingang in globale Klimamodelle finden.

Die heutigen globalen Schwerefeldmodelle werden den Anforderungen an Genauigkeit und räumlicher und insbesondere zeitlicher Auflösung nicht gerecht. Fortschritte sind durch sehr niedrigfliegende Satelliten in Verbindung mit raumgestützten Trackingverfahren zu erzielen. Ein Durchbruch ist von der geplanten u.a. speziell auf die Schwerefeldbeobachtung ausgerichteten deutschen Satellitenmission CHAMP zu erwarten (Start Mitte 1999).

Der durch CHAMP zu erwartende Genauigkeitssprung um mehr als eine Größenordnung gegenüber den jetzigen Schwerefeldmodellen ist auch essentiell, um die betragsmäßig kleinen zeitlichen Änderungen aufgrund großräumiger Massenumverteilungen nahe der Erdoberfläche zu erfassen, die ihre Ursache in postglazialen Ausgleichsprozessen, Meeresspiegeländerungen und hydrologischen und atmosphärischen Schwankungen haben.

Weitere dedizierte Schwerefeldsatellitenmissionen, wie z.B. GRACE (NASA) und GOCE (ESA), sind in Vorbereitung, um sukzessive die Genauigkeit und die räumliche und zeitliche Auflösung bei der Schwerefeldmodellierung zu steigern.

1 Die Globalstruktur des Erdschwerefelds: Darstellung, Bedeutung und Modelle

Das Schwerefeld im Außenraum der Erde wird üblicherweise repräsentiert durch Schwereanomalien bzw. Geoidundulationen, die jedem Punkt der Erdoberfläche zugeordnet werden können, oder im Spektralbereich durch die Stokes'schen Koeffizienten einer sphärischen harmonischen Entwicklung des Gravitationspotentials bzw. Störpotentials in Kugelfunktionen. Schwereanomalien, Geoidundulationen und Störpotential beziehen sich auf das Normalpotential, das durch ein angenommenes Rotationsellipsoid mit der gleichen Masse wie die Erde erzeugt wird.

Die mathematische Darstellung des Gravitationspotentials in Kugelfunktionen als fundamentale Ausgangsgleichung für die globale Betrachtungsweise in der Satellitengeodäsie lautet:

$$U(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[\bar{C}_{00} + \sum_{l=2}^{l_{\max}} \sum_{m=0}^l \left(\frac{R}{r} \right)^l \bar{P}_{lm}(\sin \varphi) (\bar{C}_{lm} \cos m\lambda + \bar{S}_{lm} \sin m\lambda) \right] \quad (1)$$

mit

- r, φ, λ - sphärische Koordinaten des Aufpunktes (Radius, Breite, Länge)
- R - Referenzlänge (mittlerer Äquatorradius)
- GM - Produkt aus Gravitationskonstante und Masse der Erde
- l, m - Grad, Ordnung der Entwicklung
- \bar{P}_{lm} - räumliche Auflösung $\approx 20000 \text{ km} / l_{\max}$ (für $r=R$)
- vollständig normierte Legendre-Polynome ($m=0$) und assoziierte Funktionen ($m>0$)
- $\bar{C}_{lm}, \bar{S}_{lm}$ - Stokes'sche Koeffizienten (vollständig normiert)

Die Stokes'schen Koeffizienten $\bar{C}_{lm}, \bar{S}_{lm}$ repräsentieren die unregelmäßige Struktur des Erdschwerefelds und sind die gesuchten Größen, die in der Satellitengeodäsie aus der Analyse von Bahnstörungen erdumkreisender Satelliten gewonnen werden. Andere Funktionale des Schwerefelds, wie Schwereanomalien oder Geoidundulationen können anschließend aus Gleichung (1) leicht abgeleitet werden (HEISKANEN, MORITZ 1984, S. 85, 89).

In den Unregelmäßigkeiten des äußeren Erdschwerefelds manifestiert sich die unregelmäßige laterale Dichte- und Massenverteilung im Erdinnern, die entweder durch isostatische Kompensation oder dynamisch aufrecht erhalten wird. Wegen der sich größtenteils gegenseitig aufhebenden Masseneffekte im Erdinnern sind die Abweichungen des beobachteten Schwerefeld vom Normalfeld eines Rotationsellipsoid mit maximalen Werten von $5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ (500 mgal) in der Schwere und 100 m im Geoid relativ gering. Die Geoidhöhe ist die Differenz zwischen der Äquipotentialfläche $U(r, \varphi, \lambda) = U_0$ nahe der Meeresoberfläche ('Normal Null') und einer bestangepaßten Ellipsoidoberfläche.

Seit Beginn des Raumfahrtzeitalters hat man Satellitenbahnstörungsbeobachtungen für die Ableitung von Schwerefeldparametern genutzt: von der exakten Bestimmung der Erdabplattung ($\bar{C}_{2,0}$ - Term) über die 'Birnenform der Erde' ($\bar{C}_{2,2}$ - Term) bis zu den heutigen globalen Erdschwerefeldmodellen (BOUMAN 1997), die rein aus Satellitenbahnbeobachtungen die Grobstruktur des Erdschwerefelds mit

einer räumlichen Auflösung von ca. 500km (halbe Wellenlänge) an der Erdoberfläche wiedergeben. Das entspricht etwa 1500 Koeffizienten $\bar{C}_{lm}, \bar{S}_{lm}$ vollständig bis zu Grad und Ordnung $l_{\max} = 36$.

Die Analyse von gravitativ erzeugten Satellitenbahnstörungen ist die einzige Möglichkeit, die Grobstruktur, d.h. den langwelligen Bereich des Erdschwerefelds homogen und zuverlässig zu vermessen. Globale Satellitenmodelle liefern die Basis, um durch Kombination mit Satellitenaltimetrie über den Ozeanen und terrestrischer, schiffs- oder flugzeuggestützter Gravimetrie die Auflösung des Erdschwerefelds bis hin Feinstrukturen, z.B. für geodätische Anwendungen und Explorationszwecke, zu steigern.

Wegen des Faktors $\left(\frac{R}{r}\right)^l$ in Gleichung (1) ist die Anwendung der Satellitenbahnmethode in

Abhängigkeit von der Flughöhe $h=r-R$ des Satelliten auf lang- bis mesoskalige Strukturen im Erdschwerefeld beschränkt.

Langwellige globale Erdschwerefeldmodelle werden in der Geophysik neben seismischen und geomagnetischen Beobachtungen als Interpretationsgrundlage für Studien über das tiefere Erdinnere, insbesondere Strukturen und Prozesse im Erdkern und Erdmantel, genutzt (z.B. WEN, ANDERSON 1997). Laterale Dichteveränderungen ergeben sich durch Undulationen an Diskontinuitätsflächen wie der Kern/Mantel-Grenze oder beim Übergang von mittleren zum oberen Mantel und durch Inhomogenitäten aufgrund dynamischer Prozesse wie der Mantelkonvektion als Motor der Plattentektonik.

In der Ozeanographie ist das Geoid eine notwendige Referenzfläche für die altimetrische Ableitung der Meerestopographie, aus der sich unmittelbar die geostrophischen absoluten Meeresströmungen ergeben. Für diese Anwendung werden Zentimeter-Geoidgenauigkeiten über einen weiten Spektralbereich bis hin zu Wellenlängen von 30km gefordert (WUNSCH 1993).

Ein immer wichtiger werdender Aspekt ist das Monitoring von klimatisch bedingten Prozessen an der Erdoberfläche wie Meeresspiegeländerungen aufgrund von Verschiebungen in der Massenbilanz zwischen polarem Eis und Meerwasser und postglazialen Relaxationsprozessen, deren Kenntnis Aufschlüsse über die Materialeigenschaften im visko-elastischen Erdinnern gibt. Diese Vorgänge sind mit großräumigen säkularen Massenumverteilungen verbunden, die als zeitliche Änderungen der Schwerefeldkoeffizienten niedrigen Grades und Ordnung über Satellitenbahnstörungen beobachtet werden können. Da diese Effekte über relativ kurze Zeiträume betrachtet nur kleine Signale erzeugen, werden zu ihrer Auflösung extreme Genauigkeiten verlangt (NRC 1997).

Die bisher erzielten Genauigkeiten bei der globalen Schwerefeldausmessung von 1m im Geoid bzw. 5mgal in der Schwere bezogen auf eine räumliche Auflösung von 500km an der Erdoberfläche sind für die skizzierten Anwendungen um ein bis zwei Größenordnungen zu niedrig, so daß international Anstrengungen unternommen werden, um durch dedizierte Schwerefeldsatellitenmissionen in die geforderten Genauigkeits- und Auflösungsbereiche zu kommen. Ein erster derartiger Satellit ist CHAMP, ein deutscher Satellit, der bereits gebaut wird und Mitte 1999 gestartet werden soll. Auf die CHAMP-Mission wird in diesem Beitrag näher eingegangen werden.

Aktuelle globale Schwerefeldmodelle aus Satellitenbahnstörungen werden (TAPLEY et al. 1996) bei der NASA (Goddard Space Flight Center), der Universität Texas (Centre for Space Research) und in Europa bei GRGS Toulouse, und dem GFZ Potsdam entwickelt. Das in französisch/deutscher Koproduktion entstandene aktuellste Model heißt GRIM4-S4 (SCHWINTZER et al. 1997), das im folgenden kurz vorgestellt werden soll.

2 Globales Schwerefeldmodell GRIM4-S4

2.1 Methode der Parameterbestimmung

Erdumkreisende Satelliten werden von Bodenstationen oder anderen Satelliten aus angemessen (s. Abbildung 1). Die Observablen sind Richtung (Kameraaufnahmen in den 60er- und frühen 70er-Jahren), Geschwindigkeit (Dopplermessungen mit Mikrowellensendern/-empfängern) oder Entfernung (Laufzeitmessungen mit Mikrowellen oder Laserimpulsen) des Satelliten beim Überflug über eine Bodenstation. Als neues zukunftssträchtiges Verfahren ist das GPS-gestützte Intersatellitentracking zwischen den hochfliegenden GPS-Satelliten und dem GPS-Empfänger an Bord eines niedrigfliegenden Satelliten bei den amerikanischen Missionen TOPEX/Poseidon (SCHWINTZER et al. 1995) und Microlab/GPS-MET erstmals für präzise geodätische Anwendungen eingesetzt worden. GPS steht für 'Global Positioning System', das amerikanische Navigationssystem mit 24 Satelliten in 20000km Höhe.

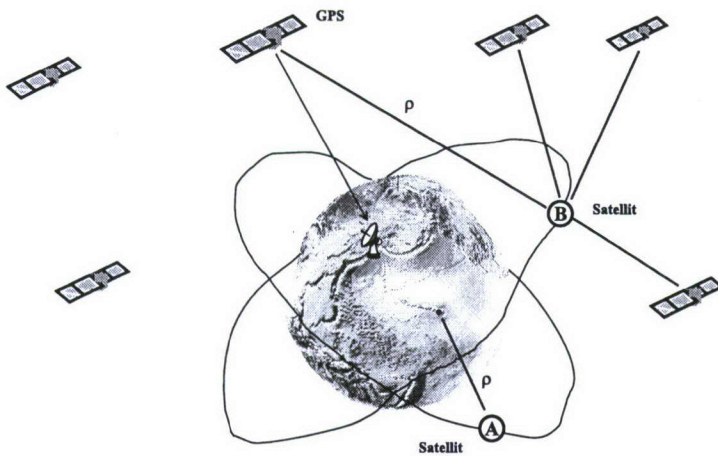


Abb. 1 Bahnverfolgung niedrigfliegender Satelliten (A) mit Bodenstationen und (B) über GPS-Satelliten.

Mit vorgegebenen genäherten Werten für Ort und Geschwindigkeit eines Satelliten zur Anfangsepoche wird die Bahn des Satelliten numerisch über einen Bogen von einigen Tagen bis zu einem Monat, je nach Höhe des Satelliten, in einem angenommenen Referenzsystem integriert. Dabei gehen Modelle aller auf den Satelliten wirkenden gravitativen (Schwerefeld, Gezeitenkräfte durch Mond, Sonne und Planeten) und nicht-gravitativen (Hochatmosphärenwiderstand, Sonnen-, Erdstrahlungsdruck) Störkräfte in die Berechnung ein. Durch Variation der Anfangselemente für Ort und Geschwindigkeit des Satelliten erhält man über eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate eine an die Bahnbeobachtungen bestangepaßte Bahn für den Integrationszeitraum. Die Residuen in den Beobachtungen nach der Bahnausgleichung enthalten dann, bei fehlerfreier Modellierung aller anderen auf den Satelliten wirkenden Kräfte und Beobachtungseinflüsse, die Information über Abweichungen zwischen dem tatsächlichen Erdschwerefeld und dem der Bahnberechnung zugrundegelegten Modell. Um die Residuen (Bahnstörungen) für die Schwerefeldmodellverbesserung zu nutzen, wird für jeden einzelnen Bogen ein Normalgleichungssystem aufgestellt, in dem die Stokes'schen Koeffizienten \bar{C}_{lm} , \bar{S}_{lm} der

Potentialdarstellung (1) als Unbekannte auftreten. Der maximale Entwicklungsgrad l_{\max} wird in Abhängigkeit von der Höhe h der Satellitenbahn und damit der Sensitivität auf gravitative Störbeschleunigungen individuell festgelegt: z.B. $l_{\max} = 25$ für den Satelliten LAGEOS ($h = 6000\text{km}$), $l_{\max} = 50$ für STARLETTE ($h = 950\text{km}$), $l_{\max} = 60$ für ERS ($h = 780\text{km}$). Da jedes einzelne Normalgleichungssystem stark überparametrisiert ist, werden die bogenweise aufgestellten Normalgleichungssysteme pro Satellit akkumuliert und unter Berücksichtigung relativer Gewichtungen über alle verfügbaren Satelli-

ten zu einem Gesamtnormalgleichungssystem kombiniert. Nach Einführung stochastischer A-priori-Information über Pseudobeobachtungsgleichungen gemäß 'Kaulas Approximation' (KAULA 1966, S. 98),

$$\begin{Bmatrix} \overline{C}_{lm} \\ \overline{S}_{lm} \end{Bmatrix} = 0 \pm 10^{-5}/l^2 \quad (2)$$

für alle Stokes'schen Koeffizienten mit $l > 10$ zur Stabilisierung des auch nach der Gesamtakkumulation wegen mangelnder Sensitivität nicht lösbaren Ausgangssystems erhält man durch Matrixinversion schließlich die gesuchte Lösung für die Schwerefeldmodellparameter (REIGBER 1989).

Die Genauigkeit und spektrale Auflösung einer neuen Schwerefeldlösung rein aus Satellitenbahnstörungen wird begrenzt durch die Bahnhöhe der Satelliten, die räumliche Verteilung der Satellitenbahnen, die Qualität und Dichte der Bahnbeobachtungen (Bodenstationsverteilung) und die Modellierungsfehler bei den nicht-gravitativen Störkräften, wobei die Modellierung des Widerstands der Restatmosphäre bei Satelliten mit Flughöhen niedriger als 1000km das größte Problem darstellt.

2.2 Datenbasis und Ausgleichungsparameter

Im Prinzip läßt sich die Grobstruktur des Erdschwerefelds allein aus den Bahnstörungen eines einzigen Satelliten ableiten. Dazu müssen aber die Grundvoraussetzungen, eine polare Bahn in niedriger Höhe von wenigen hundert Kilometern und eine kontinuierliche präzise Beobachtungsbelegung, erfüllt sein. Da keine der bisherigen geodätisch nutzbaren, d.h. mit präziser Bahnverfolgung ausgestatteten Satellitenmissionen alle drei Voraussetzungen erfüllt, ist man bei der globalen Schwerefeldmodellierung darauf angewiesen, Bahnbeobachtungen einer Vielzahl von Satelliten mit gut nach Bahnneigung und Höhe im Raum verteilten unterschiedlichen Bahnen kombiniert zu analysieren, um den gesamten Spektralbereich des Erdschwerefelds abzudecken und die Konstituenten in der Ausgleichung algebraisch trennen zu können.

Abbildung 2 skizziert die Bahnen (Bahnneigung und Bahnradius) und die Beobachtungsmethode der 34 für die GRIM4-S4-Schwerefeldlösung benutzten Satelliten. Die Namen der wichtigsten Satelliten sind explizit angegeben. Die Flughöhen liegen zwischen etwa 800km und 20000km. Es zeigt sich, daß 15 der 34 Satelliten mit Kameras, 17 mit Laserteleskopen und 9 mit Mikrowellen (Tranet- und Doris-Doppler, PRARE-Entfernungen und Doppler, GPS-Entfernungen) angemessen wurden, davon einige mit mehreren Verfahren gleichzeitig. Laserdaten des in 400km Höhe fliegenden Satelliten GFZ-1 werden gegenwärtig in das Modell integriert.

Moderne Laser- und Mikrowelleninstrumente messen die Entfernung zum Satelliten mit cm-Genauigkeit, und Geschwindigkeiten können heute über Dopplermessungen mit Genauigkeiten von 0,5mm/s aufgelöst werden. Damit läßt sich die Flugtrajektorie des Satelliten auf teilweise besser als 10cm ausgleichen. Die verglichen dazu relativ ungenauen, schon historischen Richtungsbeobachtungen leisten dennoch ihren Beitrag zur Lösung, da diese Satelliten Lücken im Spektrum bei der Gravitationsfeldausgleichung abdecken.

Insgesamt wurden 2,65 Mio Einzelbeobachtungen für das GRIM4-S4-Schwerefeldmodell verarbeitet, davon 73% Mikrowellen-, 24% Laser- und 3% optische Richtungsmessungen. Aus diesen Daten wurden Einzelnormalgleichungssysteme aus 836 integrierten und ausgeglichenen Bögen mit einer durchschnittlichen Länge von 7 Tage erzeugt, nach Reduktion der bogeninternen Parameter zu einem Gesamtsystem akkumuliert dann simultan nach den folgenden Parametern gelöst:

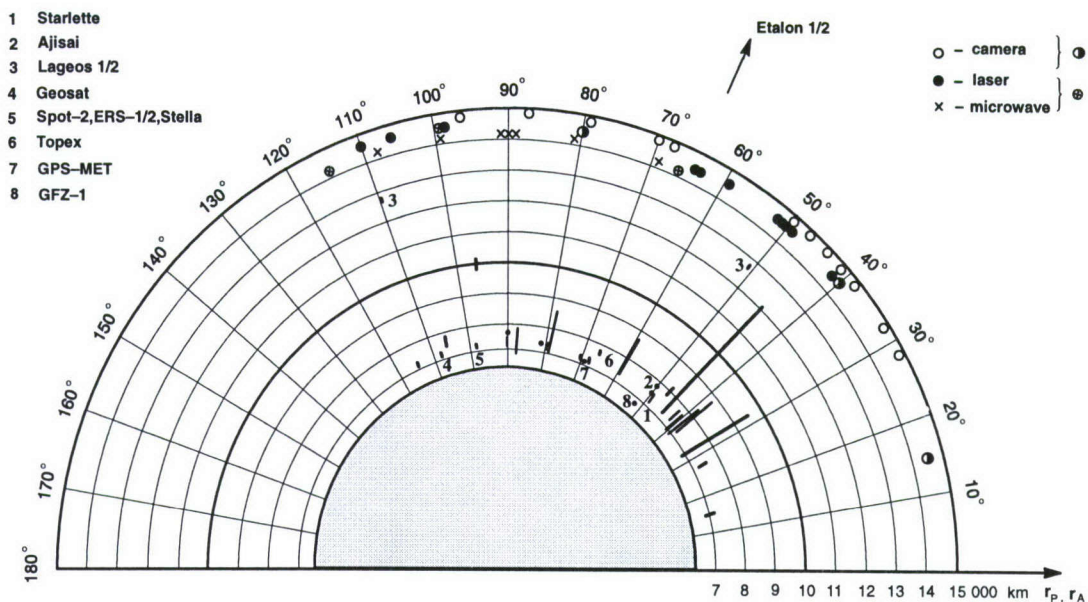


Abb. 2 Bahnneigung, Flughöhe und Beobachtungsverfahren der 34 für das GRIM4-S4-Schwerefeldmodell genutzten Satelliten (r_p - Perigäums-, r_A - Apogäumsbahnradius).

- Gravitationspotential
 - zeitlich konstanter Anteil: 3758 sphärische harmonische Koeffizienten $\bar{C}_{lm}, \bar{S}_{lm}$ (s. Gleichung 1), vollständig bis Grad/Ordnung 60 plus einige Terme höheren Grades innerhalb der resonanten Ordnungen 0, 13 und 57 (Die Koeffizienten vom Grad 1 werden wegen des Bezugs zum Geozentrum a priori Null gesetzt, und die beiden Terme mit $l=2, m=1$ werden aus den Polkoordinaten berechnet und ebenfalls nicht gelöst.)
 - säkulare Änderung in $\bar{C}_{2,0}$: signifikanter Effekt durch postglaziale Landhebung
 - Ozeangezeitenpotential: 76 Ozeangezeitenkonstituenten (Amplitude und Phase) für 8 tägliche und halbtägliche Wellen
- Stationspositionen: geozentrische kartesische Koordinaten (323 Stationen) und Änderungsraten (wegen Plattentektonik) der Satellitenbeobachtungsstationen

2.3 Auflösung und Genauigkeit

GRIM4-S4 wird repräsentiert durch die ausgeglichenen Stokes'schen Koeffizienten $\bar{C}_{lm}, \bar{S}_{lm}$ der Entwicklung des Gravitationspotentials in Kugelfunktionen. Abbildung 3 zeigt das resultierende Signalspektrum über den Entwicklungsgrad l , ausgedrückt in Geoidhöhen: Wurzel aus der Quadratsum-

me der zu einem Grad l gehörenden sphärischen harmonischen Koeffizienten des Störpotentials skaliert mit dem Erdradius. Das zugehörige Fehlerspektrum, berechnet aus den sich aus der Ausgleichung ergebenden Standardabweichungen der Koeffizienten, ist ebenfalls eingezeichnet. Beide Kurven sind auch für das Modell GRIM4-C4 (SCHWINTZER et al. 1997) gegeben, ein globales Schwerefeldmodell, das aus der Kombination des GRIM4-S4 - Normalgleichungssystems mit altimetrisch gemessenen Geoidhöhen über den Ozeanen und terrestrischen Schwereanomalien erzeugt wurde. Dieses Modell enthält wegen der Oberflächendaten den vollen Signalgehalt über den hier betrachteten Spektralbereich bis Grad/Ordnung 60. Die glatte Signalkurve entspricht der Approximation nach Kaula (KAULA 1966, S. 98).

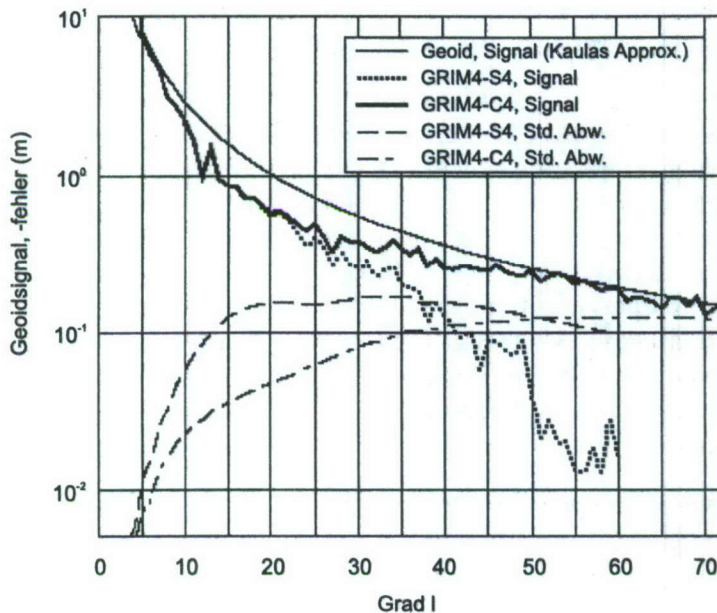


Abb. 3 Signal und Fehlerspektrum für das Geoid über Entwicklungsgrad l für die Satellitenlösung GRIM4-S4 und die Kombinationslösung GRIM4-C4 (z. Vgl. Approximation nach Kaula).

Abbildung 3 läßt deutlich erkennen, daß die reine Satellitenlösung GRIM4-S4 wegen der Schwere-signalabschwächung in Satellitenhöhe signifikant ab etwa Grad 20 an Auflösung verliert und die gradweise akkumulierten Fehler ab Grad 37 das Signal überschreiten. Einzelne höhergradige Koeffizienten bestimmter Ordnungen im Schwerefeldspektrum können allerdings aufgrund von Resonanzerscheinungen in den Satellitenbahnstörungen besser bestimmt sein, weshalb eine rechnerische Auflö-

sung des Normalgleichungssystems bis Grad/Ordnung 60 oder höher notwendig ist. Die in Abbildung 3 erkennbare Fehlerabnahme zwischen Grad 37 und 60 ist nur scheinbar und eine Folge der hier stärker wirkenden Normalgleichungsstabilisierung gemäß Gleichung (2). Die Fehlerkurve für das GRIM4-C4 - Modell ist mit Vorsicht zu interpretieren, da wegen der unterschiedliche Qualität der Oberflächendaten große Unterschiede in der Genauigkeit zwischen Ozean-, Kontinent- und Polregionen bestehen, die in der spektralen Darstellung nicht sichtbar werden.

Ein reines Satellitenmodell hat gegenüber Kombinationslösungen wie GRIM4-C4 den Vorteil, daß der langwellige Anteil des Erdschwerefelds, d.h. Strukturen mit halben Wellenlängen größer als ca. 1000km, mit homogener Genauigkeit, unbeeinflußt von systematischen Fehlern in den terrestrischen Schweredaten, aufgelöst wird. Eine Auflösung von $\lambda/2=1000\text{km}$ an der Erdoberfläche entspricht einer spektralen Auflösung bis Grad/Ordnung 20. Die rechnerische Auflösung des GRIM4-S4-Modells mit Koeffizienten bis Grad/Ordnung 60 entspricht einer räumlichen Auflösung von $\lambda/2=330\text{km}$ an der Erdoberfläche.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die dem GRIM4-S4 - Gravitationspotentialmodell entsprechende geographische Verteilung der Geoidhöhen und Freiluftschwereanomalien, bezogen auf ein zugrunde gelegtes Ellipsoidnormalpotential. Das Geoid variiert zwischen +80m und -100m. Die Genauigkeit beträgt im Mittel ca. $\pm 1\text{m}$, bezogen auf die oben genannte Auflösung. Abbruchfehler durch die Vernachlässigung von Termen höheren Grades als l_{max} in Gleichung (1) sind unberücksichtigt. Die Schwereanomalien variieren zwischen -60mgal und +75mgal bei einer Genauigkeit von $\pm 5\text{mgal}$ (ohne Abbruchfehler). Während beim Geoid fast das gesamte Signal im langwelligen Anteil konzentriert ist, gilt das Gegenteil für das Schwereanomaliespektrum. Daraus folgt, daß für die Interpretation eines Schwerefeldmodells hinsichtlich Strukturen im tiefen Erdinnern das Geoid vorzuziehen ist, während oberflächennahe Lithosphärenstrukturen sich signifikanter in den Schwereanomalien ausprägen.

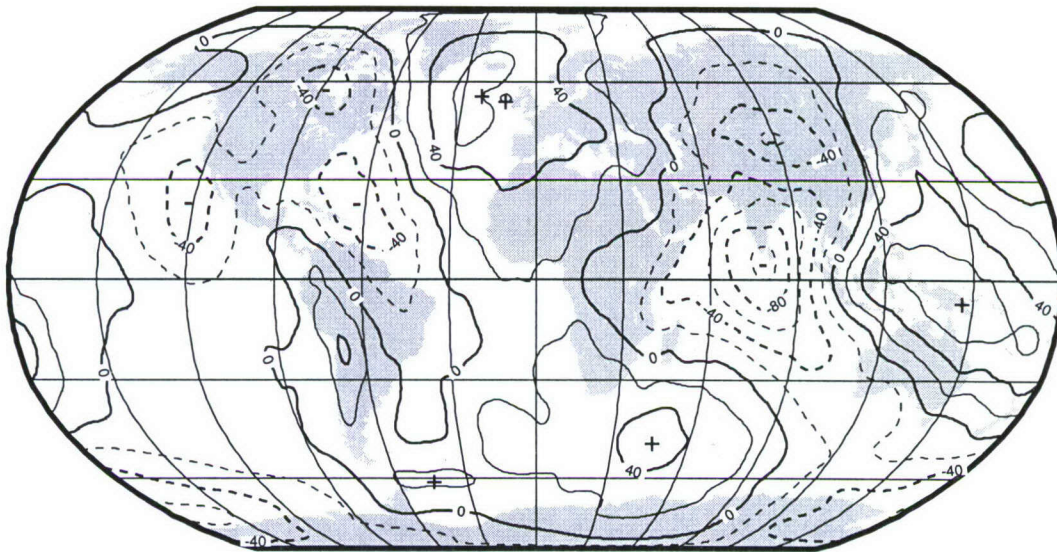


Abb. 4 GRIM4-S4: Geoid ($GM = 398600,438\text{km}^3/\text{s}^2$, $R = 6378136\text{m}$), Konturintervall = 20m, negative Isolinien unterbrochen, positive Isolinien durchgezogen dargestellt

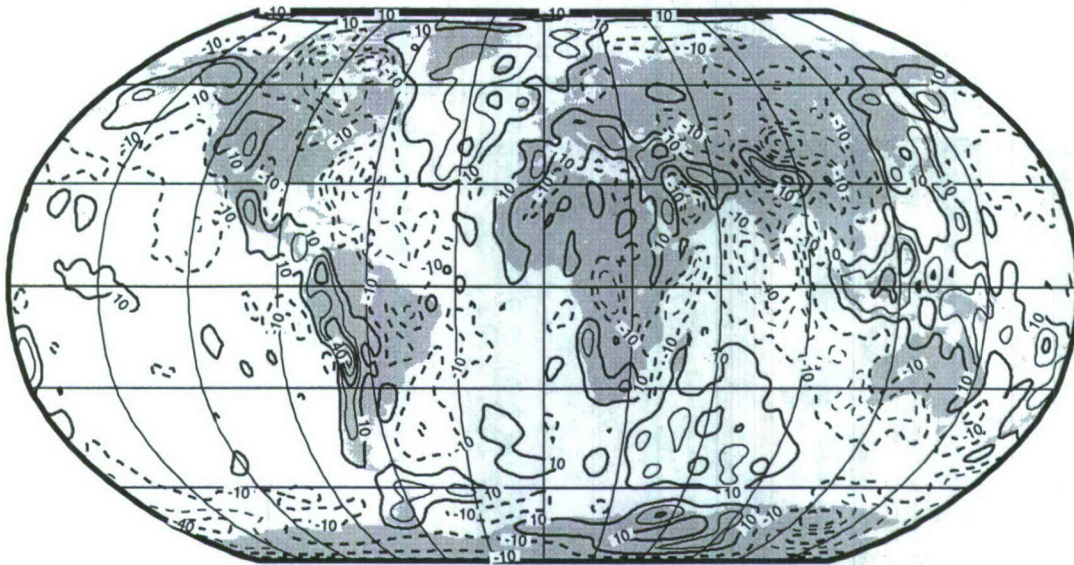


Abb. 5 Schwereanomalien ($GM = 398600,438 \text{ km}^3/\text{s}^2$, $R = 6378136 \text{ m}$), Konturintervall = 15 mgal , negative Isolinien unterbrochen, positive Isolinien durchgezogen dargestellt

3 Erwartungen an CHAMP und andere dedizierte Satellitenschwerefeldmissionen

Schon seit vielen Jahren werden Anstrengungen aus dem Kreis der geodätischen Wissenschaftler heraus unternommen, bei nationalen oder internationalen Weltraumorganisationen eine Satellitenmission durchzusetzen, die bei der Erdschwerefeldausmessung hinsichtlich Auflösung, Homogenität und Genauigkeit einen Durchbruch zu leisten imstande ist. Treibende Faktoren nach erheblich verbesserten Schwerefeldmodellen sind heute, nachdem durch die Satellitenaltimetrie und die Freigabe bzw. Beobachtung terrestrischer Schwerewerte die meisten weißen Flächen auf der Schwerekarte verschwunden sind, die Forderung nach einem altimetrieunabhängigen Geoid mit Zentimetergenauigkeit als Referenzfläche für die dann altimetrisch bestimmbare Meerestopographie sowie das wachsende Interesse an der Detektion zeitlicher Schwereänderungen aufgrund großräumiger Massenumverteilungen in bzw. zwischen fester Erde, Atmosphäre, Hydrosphäre und Cryosphäre.

Als erster kleiner Schritt in diese Richtung wurde im April 1995 der passive Lasersatellit GFZ-1 (s. Abbildung 6) von der russischen MIR-Raumstation aus auf seine mit 400 km sehr niedrige Bahn gesetzt. Diese vom GFZ initiierte und getragene Mission erfüllt zwar die Forderung nach einer gegenüber allen bisher geodätisch nutzbaren Satelliten signifikant niedrigeren Bahn, hat aber andererseits die Nachteile einer sehr lückenhaften Bahnverfolgung durch nur ca. 12 Laserstationen weltweit, einer nicht-polaren Bahn (52° Inklination) und von schwierig zu modellierenden Atmosphärenstörbeschleunigungen. Deshalb ist der Beitrag von GFZ-1 zur Schwerefeldmodellverbesserung nur sehr begrenzt (KÖNIG et al. 1996).

Die genannten Nachteile werden von der geplanten Mission CHAMP (Abbildung 7) vermieden, die alle Voraussetzungen für eine durchgreifende Verbesserung der Modellierung lang- bis mesoskaliger Schwerefeldanteile erfüllt (REIGBER et al. 1996):

- sehr niedrige Bahn (450 km Anfangshöhe, abnehmend auf 300 km über 5 Jahren),
- polnahe Bahn (87° Inklination),
- kontinuierliche präzise Bahnvermessung durch hoch-niedrig GPS-Intersatellitentracking,

- direkte Messung der Oberflächenstörkräfte (hauptsächlich Atmosphärenreibung) mit dreiachsigem Akzelerometer im Massenschwerpunkt des Satelliten,
- lange Missionsdauer (5 Jahre) zur Erfassung zeitlicher Schwereänderungen.

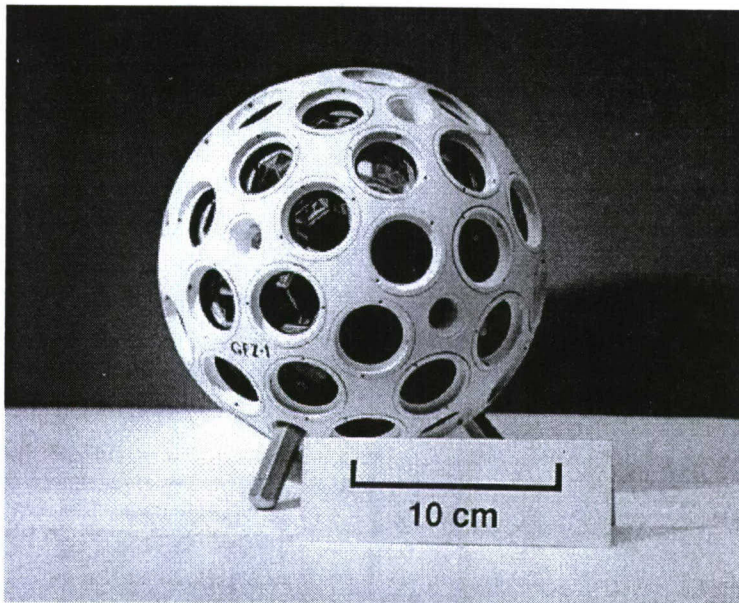


Abb. 6 Der Laserreflektor-Satellit GFZ-1.

CHAMP wurde in der wissenschaftlichen Zielsetzung von Wissenschaftlern des GFZ und des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR) definiert, und befindet sich unter der Projektleitung des GFZ seit Anfang 1997 in der Realisierungsphase. Der Start des Satelliten ist für Mitte 1999 mit einer russischen COSMOS-Rakete vorgesehen. Das Projekt wird national als Leitprojekt für die Raumfahrtindustrie der Neuen Bundesländer gefördert unter Eigenbeteiligung des GFZ und des DLR. Neben dem Erdschwerefeld sind das Erdmagnetfeld (Magnetometer auf dem 4m-langen Ausleger in Flugrichtung des Satelliten) und die Atmosphärensondierung (GPS-Okkultationsmessungen mit der rückseitig angebrachten GPS-Antenne) weitere Missionsziele. Die in Abbildung 7 dargestellten Nutzlastkomponenten sind für die präzise Bahnbestimmung und die Trennung in gravitative und nicht-gravitative Störbeschleunigungen bestimmt. Über Sternkameras wird die Ausrichtung des Satelliten und damit die Orientierung der Akzelerometerachsen gemessen. Mit der in Nadirrichtung angebrachten GPS-Antenne soll ein Experiment zur GPS-Altimetrie durchgeführt werden.

Numerische Simulationen (SCHWINTZER et al. 1994) mit realistischen Missions- und Fehlerannahmen haben bewiesen, daß allein mit einem Satelliten wie CHAMP bereits nach einer Beobachtungszeit von einigen Wochen der langwellige Anteil des Erdschwerefelds bis etwa Grad/Ordnung 30 vollständig und um mehr als eine Größenordnung genauer als bei heutigen Modellen aufgelöst werden kann. Während bei GRIM4-S4 an säkularen Änderungen nur eine Drift in $\overline{C}_{2,0}$ sinnvoll gelöst werden kann, werden mit CHAMP langzeitliche Änderungen einer Reihe anderer niedriggradiger Koeffizienten schätzbar sein. Ziel ist es, das relativ große Signal (0,1 mm/Jahr in $R \cdot \overline{C}_{2,0}$) aufgrund post-glazialer Ausgleichsprozesse von den kleineren z.B. durch Meeresspiegel- und Eismassenänderungen hervorgerufenen Signalen, trennen zu können.

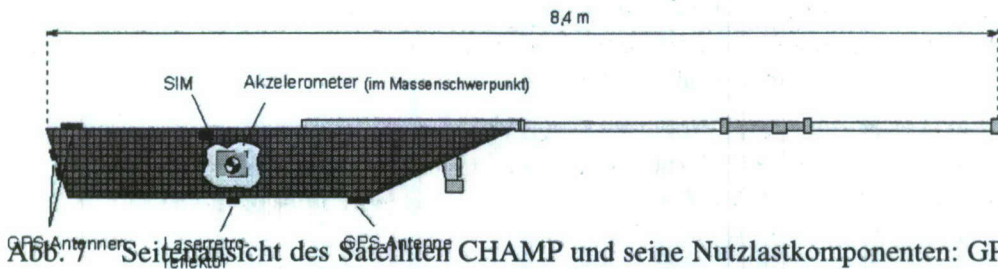


Abb. 7 Seitenansicht des Satelliten CHAMP und seine Nutzlastkomponenten: GPS, Akzelerometer, Sternkameras (SIM) und Laserretroreflektoren dienen der Bahn- und Schwerefeldbestimmung, der Ausleger trägt die Instrumentierung für die Magnetfeldausmessung.

In der Folge von CHAMP geplante Schwerefeldsatellitenmissionen und -konzepte zielen auf weitere Genauigkeitsgewinne bei gleichzeitig erheblich gesteigerter Auflösung bis hin zu Grad/Ordnung 150 oder 180 ($\lambda/2 \sim 100\text{ km}$ an der Erdoberfläche). Solche Missionen sind das amerikanische mit deutscher Beteiligung schon bewilligte Projekt GRACE (DAVIS et al. 1996), eine ab 2001 geplante Doppelsatellitenmission mit ultra-präziser Entfernungsmessung zwischen den auf gleicher Bahn hintereinander fliegenden Satelliten, und die bei der europäischen Weltraumbehörde ESA untersuchte Gradiometermission GOCE (SCHUYER 1997) mit paarweise angeordneten Akzelerometern zur Messung von Schweregradienten direkt an Bord des Satelliten.

Die durch CHAMP und GRACE in naher Zukunft zu erwartenden erheblich verbesserten globalen Erdschwerefeldmodelle werden neue Anwendungsgebiete und Interpretationsmöglichkeiten in der Geodäsie, Geophysik, Ozeanographie und Klimaforschung erschließen.

4 Literaturhinweise

4.1 Literaturverzeichnis

- BOUMAN, J.: *A Survey of Global Gravity Models*. DEOS Report no 97.1, TU Delft 1997
- DAVIS, E.S., MELBOURNE, W.G., REIGBER, CH., TAPLEY, B.D., WATKINS, M.M.: GRACE - An SST Mission for Gravity Mapping. Suppl. to *EOS, Transactions of the American Geophys. Union* 77 (17), S40, 1996
- HEISKANEN, W., MORITZ, H.: *Physical Geodesy*. W.H. Freeman and Co., San Francisco, 1967, corrected reprint, Inst. of Phys. Geodesy, Tech. Univ. Graz, Austria, 1984
- KAULA, W.M.: *Theory of Satellite Geodesy*. Blaisdell, Waltham, Massachusetts, 1966
- KÖNIG, R., SCHWINTZER, P., BODE, A., REIGBER, CH.: GFZ-1 A Small Laser Satellite Mission for Gravity Field Model Improvement. *Geophys. Res. Letters* 23, 3143-3146, 1996
- NRC (National Research Council): *Satellite Gravity and the Geosphere*. National Academy Press, Washington D.C., 1997
- REIGBER, CH.: Gravity Field Recovery from Satellite Tracking Data. In: F. Sansò, R. Rummel (eds.): *Theory of Satellite Geodesy and Gravity Field Determination*. 197-234, Springer, Berlin, 1989
- REIGBER, CH., SCHWINTZER, P., LÜHR, H.: CHAMP - A Challenging Minisatellite Payload for Geoscientific Research and Application. In: P. Röser, R. Sandau, A. Valenzuela (eds.): *Small Satellites for Earth Observation*. 72-75, W. de Gruyter, Berlin, 1996

- SCHUYER, M.: European Capabilities and Prospects for a Spaceborne Gravimetric Mission. In: F. Sansò, R. Rummel, (eds.): *Geodetic Boundary Value Problems in View of the One Centimeter Geoid*. 569-589, Springer, Berlin, 1997
- SCHWINTZER, P., KANG, Z., REIGBER, CH., ZHU, S.Y.: Deterministic Simulation of Global Gravity Field Recovery from STEP-GPS SST Data, and Oceanographic Implications. In: R. Rummel, P. Schwintzer (eds.): *A Major STEP for Geodesy*. 105-118, Report 1994 of the STEP Geodesy Working Group, München/Potsdam, 1994.
- SCHWINTZER, P., KANG, Z., REIGBER, CH., ZHU, S.Y.: GPS Satellite-to-Satellite Tracking for TOPEX/POSEIDON Precise Orbit Determination and Gravity Field Model Improvement. *J. Geodynamics* 20, 155-166, 1995
- SCHWINTZER, P., REIGBER, CH., BODE, A., KANG, Z., ZHU, S.Y., MASSMANN, F.-H., RAIMONDO, R.C., BIANCALE, R., BALMINO, G., LEMOINE, J.M., MOYNOT, B., MARTY, J.C., BARLIER, F., BOUDON, Y.: Long Wavelength Global Gravity Field Models - GRIM4-S4, GRIM4-C4. *J. Geodesy* 71, 189-208, 1997
- TAPLEY, B.D., WATKINS, M.M., RIES, J.C., DAVIS, G.W., EANES, R.J., POOLE, S.R. RIM, H.J., SCHUTZ, B.E., SHUM, C.K., NEREM, R.S., LERCH, F.J., MARSHALL, J.A., KLOSKO, S.M., PAVLIS, N.K., WILLIAMSON, R.G.: The JGM-3 Gravity Model. *J. Geophys. Res.* 101 (B12), 28029-28049, 1996
- WEN, L., ANDERSON, D.L.: Layered Mantle Convection - A Model for Geoid and Topography. *Earth Planet. Sci. Lett.* 146, 367-377, 1997
- WUNSCH, C.: Physics of the Ocean Circulation. In: R. Rummel, F. Sansò (eds.): *Satellite Altimetry in Geodesy and Oceanography*. 9-98, Springer, Berlin, 1993

MODELLENTWICKLUNG FÜR DIE KINEMATISCHE VERMESSUNG VON LANDVERKEHRSWEGEN

Dr.-Ing. Wang Jianguo
Dipl.-Ing. Harald Sternberg

Institut für Geodäsie
Universität der Bundeswehr München
85577 Neubiberg

Zusammenfassung

Die kinematische Vermessung der Topographie von einem Landfahrzeug aus bildet sich als neue Meßmethode heraus. Die dafür entwickelten 2D- und 3D-Modelle werden in dieser Arbeit anhand des Projektes KiSS (Kinematic Survey System – kinematisches Vermessungssystem) erläutert und unter Verwendung des Kalman-Filters bewertet. Im System KiSS werden verschiedene Sensoren wie Global Positioning System (GPS) Empfänger, Inertial Navigation System (INS), Wegsensor und Barometer zur Erfassung der Trajektorie eingesetzt und in einem gemeinsamen Filter verarbeitet. Die Ergebnisse aus simulierten und realen Daten werden diskutiert.

1 Einleitung

Mit den für die Navigation entwickelten neuen Techniken wie Global Positioning System (GPS) und Inertial Navigation System (INS) öffnet sich dem Vermessungsingenieur der neue Arbeitsbereich der kinematischen Vermessung (DVW Heft 22/1996; DVW Heft 29/1998). Die Modellbildung für die kinematische Vermessung ist eine der wichtigsten Aufgaben bei der Systementwicklung und von großer Bedeutung für den Erfolg oder Mißerfolg des ganzen Verfahrens.

Um die gefahrene Trajektorie des Meßfahrzeuges mit sehr hoher Genauigkeit im Raum bestimmen zu können, beruhen alle entwickelten Systeme für kinematische Vermessungen im Landfahrzeug auf Multisensorkonzepten. Bei Multisensorsystemen können sich die verschiedenen Sensoren sehr sinnvoll gegenseitig aufgrund unterschiedlicher funktioneller Eigenschaften ergänzen und stützen. Das System KiSS integriert GPS, INS und zusätzliche Sensoren wie Weggeber und Barometer. Zur Erfassung von fahrbahnnahe Objekten werden zwei CCD Kameras eingesetzt.

Zur Auswertung der Meßdaten eines kinematischen Meßsystems wendet man die Filterungstheorie an, z.B. das Kalman Filter. Zuerst muß man den Bewegungszustand des Meßfahrzeuges mit Hilfe der Kinematik und Dynamik beschreiben. Daraus folgen die sogenannten Zustandsgleichungen des kinematischen Meßsystems. Dann modelliert man den Zusammenhang der Beobachtungen aus den Sensoren mit den Zustandsparametern und erhält die Meßgleichungen. Die Meß- und Zustandsgleichungen werden im Kalman Filter kombiniert mit dem Ziel eine optimale Schätzung des aktuellen Zustandes zu erhalten. Die Datenverarbeitung zielt ferner darauf ab, die Auswirkungen bekannter und unbekannter Fehler in den Signalen auf den zu schätzenden Zustandsvektor effizient zu kompensieren oder zumindest zu dämpfen (WANG, 1997).

Vorgestellt werden hier die Modellentwicklungen für die Zustandsschätzung des KiSS. Ausgehend von der kinematischen Theorie werden die entwickelten 2D- und 3D-Modelle erläutert. An Daten von Testfahrten und an simulierten Daten werden die Modelle überprüft.

2 Beschreibung der Bewegung eines materiellen Punktes

Der Bewegungszustand eines Objekts kann, ohne Bezug auf die Kräfte als die Ursachen für die verschiedenen Bewegungsarten, durch die Kinematik beschrieben werden. Der Rahmen für die mathematische Beschreibung von Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung eines mechanischen Systems sind geeignete Koordinatensysteme. Zwei Bezugssysteme, die sich relativ zueinander bewegen, werden hier betrachtet (Abb. 2.1). Das eine System bezeichnen wir als „raumfestes System“ $S(o-xyz)$, das andere als „bewegtes System“ $S_b(o_b-x_b y_b z_b)$.

2.1 Der Ortsvektor

Die Lage eines Punktes P wird eindeutig durch den zeitabhängigen Ortsvektor \vec{r} beschrieben und im raumfesten System mit Hilfe seiner drei Einheitsvektoren, \vec{i} , \vec{j} und \vec{k} , die den drei Achsrichtungen x , y und z im raumfesten System entsprechen, darstellt,

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}. \quad (2.1)$$

Zur Komponentendarstellung des Bewegungszustandes kann man Gl. (2.1) zur Momentanzeit t um einen Referenzzeit-

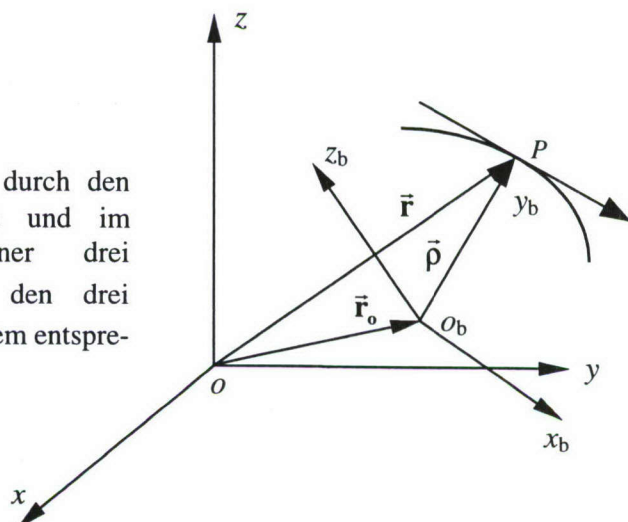


Abb. 2.1 Bewegung eines materiellen Punktes

punkt t_0 Gl. (2.2) entwickeln.

$$x(t) = x(t_0) + \dot{x}(t_0)(t - t_0) + \frac{1}{2}\ddot{x}(t_0)(t - t_0)^2 + \frac{1}{6}\dddot{x}(t_0)(t - t_0)^3 + \dots, \quad (2.2)$$

$$y(t) = y(t_0) + \dot{y}(t_0)(t - t_0) + \frac{1}{2}\ddot{y}(t_0)(t - t_0)^2 + \frac{1}{6}\dddot{y}(t_0)(t - t_0)^3 + \dots, \quad (2.3)$$

$$z(t) = z(t_0) + \dot{z}(t_0)(t - t_0) + \frac{1}{2}\ddot{z}(t_0)(t - t_0)^2 + \frac{1}{6}\dddot{z}(t_0)(t - t_0)^3 + \dots. \quad (2.4)$$

Hierin sind $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dots, \ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ die ersten bis die dritten Ableitungen von x, y, z nach der Zeit t . Um diese Entwicklung nach wenigen Gliedern abbrechen zu können, muß $t - t_0$ als (differentiell) klein vorausgesetzt werden.

2.2 Die Drehmatrix

Sei ein Vektor $\vec{r}_0(t)$ für den Ursprung o_b und ein Vektor $\vec{\rho}(t)$ für die relative Lage von o_b zu P im raumfesten System gegeben, so entnimmt man Abb. 2.1

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0(t) + \vec{\rho}(t). \quad (2.5)$$

Der Übergang von $\vec{\rho}(t)$ auf die Darstellung $\vec{\rho}_b(t)$ bezüglich des bewegten Systems erfolgt mit

$$\vec{\rho}_b(t) = D(t)\vec{\rho}(t), \quad \vec{\rho}(t) = D^T(t)\vec{\rho}_b(t). \quad (2.6)$$

$D(t)$ beschreibt die Transformation des „raumfesten“ in das „bewegten“ System und ist orthogonal:

$$D(t)D^T(t) = D^T(t)D(t) = E. \quad (2.7)$$

Mit Hilfe von $D(t)$ werden die Komponentendarstellungen ein- und desselben Vektors in zwei verschiedenen Koordinatensystemen miteinander verknüpft.

Durch Differentiation der Identität von Gl. (2.7) nach der Zeit findet man

$$\Omega(t) = \dot{D}^T(t)D(t) = -D^T(t)\dot{D}(t). \quad (2.8)$$

Diese s.g. Spinmatrix $\Omega(t)$ ist schief-symmetrisch. Jeder schief-symmetrischen Matrix läßt sich ein dem raumfesten System entsprechender axialer Vektor zuordnen, der mit $\vec{\omega}(t)$ oder $\vec{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ bezeichnet und auch Vektor der Winkelgeschwindigkeit genannt wird. Mit dieser Winkelgeschwindigkeit dreht sich das bewegte System gegen das raumfeste System. Die Matrix $\Omega(t)$ und der Vektor $\vec{\omega}(t)$ hängen folgendermaßen zusammen:

$$\Omega(t) = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.9)$$

Mit einem beliebigen Vektor $\vec{b}(t)$ gilt im allgemeinen für die Matrix $\Omega(t)$ und den Vektor $\vec{\omega}(t)$:

$$\vec{\omega}(t) \times \vec{b}(t) = \Omega(t)\vec{b}(t). \quad (2.10)$$

2.3 Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck

Die Größen Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck werden direkt durch Differentiation des Ortsvektor $\vec{r}(t)$ nach der Zeit t gewonnen.

Der *Geschwindigkeitsvektor* lautet:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}_f(t) + \vec{v}_r(t) \quad (2.11)$$

mit

$$\vec{v}_f(t) = \dot{\vec{r}}_0(t) + \vec{\omega}(t) \times \vec{\rho}(t) \quad (\text{Führungsgeschwindigkeit}) \quad (2.12)$$

$$\vec{v}_r(t) = \dot{\vec{\rho}}(t) = D^T(t) \dot{\vec{\rho}}_b(t). \quad (\text{Relativgeschwindigkeit}) \quad (2.13)$$

Dabei ist die Ableitung des Ortsvektors $\vec{\rho}_b(t)$:

$$\dot{\vec{\rho}}_b(t) = \frac{\delta x_b}{\delta t} \vec{i}_b + \frac{\delta y_b}{\delta t} \vec{j}_b + \frac{\delta z_b}{\delta t} \vec{k}_b. \quad (2.14)$$

Der *Beschleunigungsvektor* folgt weiter als die Änderung der Geschwindigkeit bezogen auf die Zeit t

$$\vec{a}(t) = \vec{a}_f(t) + \vec{a}_c(t) + \vec{a}_r(t) \quad (2.15)$$

mit den Abkürzungen

$$\vec{a}_f(t) = \ddot{\vec{r}}_0(t) + \dot{\vec{\omega}}(t) \times \vec{\rho}(t) + \vec{\omega}(t) \times [\vec{\omega}(t) \times \vec{\rho}(t)] \quad (\text{Führungsbeschleunigung}), \quad (2.16)$$

$$\vec{a}_c(t) = 2\vec{\omega}(t) \times \vec{v}_r(t) \quad (\text{Coriolisbeschleunigung}), \quad (2.17)$$

$$\vec{a}_r(t) = D^T(t) \ddot{\vec{\rho}}_b(t) \quad (\text{Relativbeschleunigung}). \quad (2.18)$$

dabei ist

$$\ddot{\vec{\rho}}_b(t) = \frac{\delta^2 x_b}{\delta t^2} \vec{i}_b + \frac{\delta^2 y_b}{\delta t^2} \vec{j}_b + \frac{\delta^2 z_b}{\delta t^2} \vec{k}_b. \quad (2.19)$$

Der dritte Summand in der Führungsbeschleunigung stellt die Zentripetalbeschleunigung dar:

$$\vec{a}_z(t) = \vec{\omega}(t) \times [\vec{\omega}(t) \times \vec{\rho}(t)]. \quad (2.20)$$

Der *Ruckvektor* wird als die Änderung der Beschleunigung nach der Zeit t definiert:

$$\begin{aligned} \ddot{\vec{r}}(t) = & \ddot{\vec{r}}_0(t) + \ddot{\vec{\omega}}(t) \times \vec{\rho}(t) + 2\dot{\vec{\omega}}(t) \times [\vec{\omega}(t) \times \vec{\rho}(t)] + \vec{\omega}(t) \times [\dot{\vec{\omega}}(t) \times \vec{\rho}(t)] + \\ & + 3\vec{\omega}(t) \times [\vec{\omega}(t) \times \vec{v}_r(t)] + \vec{\omega}(t) \times [\vec{\omega}(t) \times [\vec{\omega}(t) \times \vec{\rho}(t)]] + 3\dot{\vec{\omega}}(t) \times \vec{v}_r(t) + \\ & + 3\vec{\omega}(t) \times \vec{a}_r(t) + \frac{\delta \vec{a}_r(t)}{\delta t} \end{aligned} \quad (2.21)$$

mit

$$\frac{\delta \vec{a}_r(t)}{\delta t} = D^T(t) \ddot{\vec{\rho}}_b(t) = D^T(t) \left(\frac{\delta^3 x_b}{\delta t^3} \vec{i}_b + \frac{\delta^3 y_b}{\delta t^3} \vec{j}_b + \frac{\delta^3 z_b}{\delta t^3} \vec{k}_b \right). \quad (2.22)$$

Der Ruck kann zur Analyse der Modellfehler für ein approximiertes Modell verwendet werden.

Um den tatsächlichen Bewegungszustand eines Fahrzeuges so genau wie möglich zu erfassen, benötigt man ein komplexes Modell, weil auch die Dynamik des Fahrzeugs relativ komplex ist (D'SOUZA, GARG, 1984; POPP, SCHIEHLEN, 1993). In der Praxis ist man jedoch gezwungen, möglichst einfach zu modellieren. Das theoretische Modell wird daher durch Approximation in ein praktisches Modell überführt. Dessen Komplexität ist abhängig davon, welchem Zweck es dient und welche Sensoren im

System eingesetzt werden. Ob der Approximationsgrad eines Modells zulässig ist, wird folgendermaßen geprüft: Zuerst wird ein praktisches Modell formuliert. Dann wird analysiert, ob dessen Modellfehler für die vorgegebene Anforderung signifikant sind. Soweit notwendig kann das approximierte Modell dann weiter verbessert werden.

Nach der klassischen Dynamik kann das Fahrzeug zur Beschreibung der Fahrzeugspur als ein starrer Körper behandelt werden [D'SOUZA, GARG, 1984]. Die Beobachtungen aus den Sensoren werden auf den Massepunkt reduziert. Damit kann der Bewegungszustand des Fahrzeuges durch den Bewegungszustand seines Massenpunkts dargestellt werden. Mit dieser Annahme werden praktische Modelle zur Beschreibung der Bewegung des Fahrzeuges formuliert und ihre Modellfehler analysiert.

3 Beobachtungen und Meßplanung

3.1 Beobachtungen

Ein Modell, das ein System repräsentiert und mit Hilfe des Kalman-Filters ausgewertet wird, besteht in der Regel aus zwei Anteilen, den Zustands- und den Beobachtungsgleichungen. Die Wahl des Zustands steht nicht nur mit der Theorie der Kinematik und Dynamik eines Fahrzeuges, sondern auch mit den von den eingesetzten Sensoren erhaltenen Beobachtungen in engem Zusammenhang.

Die Sensoren dienen bei der kinematischen Vermessung dazu, die Position des Fahrzeuges und seine Orientierung im Raum zu jedem Abtastzeitpunkt mittelbar oder unmittelbar zu bestimmen. Mit wenigen Sensoren können nur wenige Komponenten im Zustandsvektor effektiv bestimmt werden. Wenn die Anzahl der Komponenten im Zustandsvektor viel größer ist, als die im Beobachtungsvektor, kann man die geforderte Genauigkeit und Zuverlässigkeit nicht erreichen. Dazu kommt noch die Abstimmung der Meßgenauigkeiten verschiedener Sensoren (WANG, 1997; CASPARY, WANG, 1998). Zudem ist auch die Wirtschaftlichkeit in Betracht zu ziehen, wenn mehrere Sensoren eingesetzt werden sollen. Gleichzeitig gibt es nur eine beschränkte Anzahl an Sensoren, die für kinematische Vermessungen zur Verfügung stehen.

Zur Bestimmung der Trajektorie eines Fahrzeuges, bezogen auf ein räumliches Koordinatensystem können in der kinematischen Vermessung verschiedene Größen in bestimmten Zeitintervallen beobachtet werden, zum Beispiel:

- | | |
|----------------------------|--|
| a) x, y, z | Positionskoordinaten aus GPS-Messungen im raumfesten Koordinatensystem, |
| b) v_x, v_y, v_z | Geschwindigkeiten aus GPS-Messungen im raumfesten Koordinatensystem, |
| b) v_t | Geschwindigkeit in Fahrtrichtung aus dem Weggeber, |
| c) α, β, γ | Lagewinkel als Euler-Winkel oder Kardan-Winkel aus INS |
| d) δh | Höhendifferenz aus Barometer |
| e) a_t, a_r, a_b | Beschleunigungen in Tangential-, Radial(auch als Zentripetal)- und Binormalrichtungen durch Beschleunigungsmesser. |

Weitere denkbare Beobachtungen sind Drehraten aus einem INS, oder Azimut φ der Fahrtrichtung durch Kompaß oder Kreisel. In manchen Fällen ist es auch möglich, das Fahrzeug von außen mit den entsprechenden Beobachtungen zu verfolgen.

Mit den angegebenen Beobachtungen läßt sich das hier vorgestellte System als ein hybrides System interpretieren, das aus einem Position-Fixing-Subsystem mit GPS und einem Subsystem der Koppelnavigation mit Weggeber/Beschleunigungsmesser und INS/Kompaß besteht. Zu beachten ist, daß die Beobachtungen mit ihrer Zeit erfaßt und auf den Massepunkt des Fahrzeuges reduziert werden müssen.

Für das System KiSS wurde ein Bewegungsmodell für die zweidimensionale (2D) Ebene und eines für den dreidimensionalen (3D) Raum entwickelt. Für das 2D-Modell werden als meßbare Größen nur die Koordinaten x, y , die Tangentialgeschwindigkeit v_t und das Azimut φ berücksichtigt. Dagegen

werden die GPS-Koordinaten x, y, z und -Geschwindigkeiten v_x, v_y, v_z , drei Lagewinkel α, β, γ , die Tangentialgeschwindigkeit v_t und die Barometerhöhe für das 3D-Modell eingesetzt. Davon ausgehend werden die Modelle entwickelt. Wenn man andere oder weitere Sensoren einsetzen will, braucht man nur das Modell entsprechend zu ändern. Damit ändern sich natürlich die numerischen Ergebnisse. Die prinzipiellen Folgerungen und die ablaufenden Bearbeitungsprozesse bleiben jedoch gleich.

3.2 Meßplanung

Die Datenauswertung ist offensichtlich abhängig von der Durchführung der kinematischen Messungen im Feld. Im allgemeinen kann man die Geschwindigkeit v und die Lagewinkel α, β, γ quasi kontinuierlich (> 30 Hz), die GPS-Beobachtungen x, y, z, v_x, v_y, v_z dagegen nur in größeren Zeitintervallen (z.B. 5Hz) erfassen. Abb. 3.1 stellt die Meßplanung für die Zustandsschätzung im 2D-Modell als Beispiel dar.

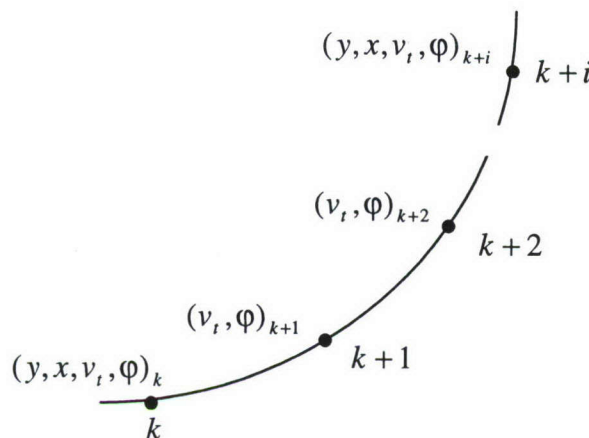


Abb. 3.1 Meßentwurf für die 2D-Datenerfassung

4 Modelle in der Ebene

Im folgenden werden zwei 2D-Modelle zur kinematischen Vermessung von Landverkehrswegen vorgestellt. Für eine ausführliche Darstellung sei auf WANG (1997) verwiesen.

4.1 Die 2D-Drehmatrix

Um die Modelle in Komponentendarstellung zu erhalten, wird zuerst die 2D-Drehmatrix angegeben. Auf einer 2D-Ebene können ein bewegtes kartesisches Koordinatensystem und ein raumfestes Koordinatensystem nach Abb. 4.1 definiert werden. Mit dem Azimut $\varphi(t)$ wird die Drehmatrix wie folgt gebildet:

$$D(t) = \begin{pmatrix} \sin \varphi(t) & \cos \varphi(t) \\ -\cos \varphi(t) & \sin \varphi(t) \end{pmatrix}. \quad (4.1)$$

4.2 Das 2D-Modell I: gleichförmige Kreisbewegung

Das Modell der gleichförmigen Kreisbewegung wird bezogen auf die Bedingung von $\|\vec{\omega}(t)\| = 0$ und besteht aus einem Zustandsvektor mit 5 Parametern, y, x, φ, v_t und a_r . Dieses Modell enthält die Tangentialbeschleunigung a_t (Änderung der Geschwindigkeit v_t), und den Zentripetalruck j_r (Änderung der Zentripetal- oder Radialbeschleunigung a_r), zwei Fehlerfaktoren des Prozeßrauschens (Modellfehler).

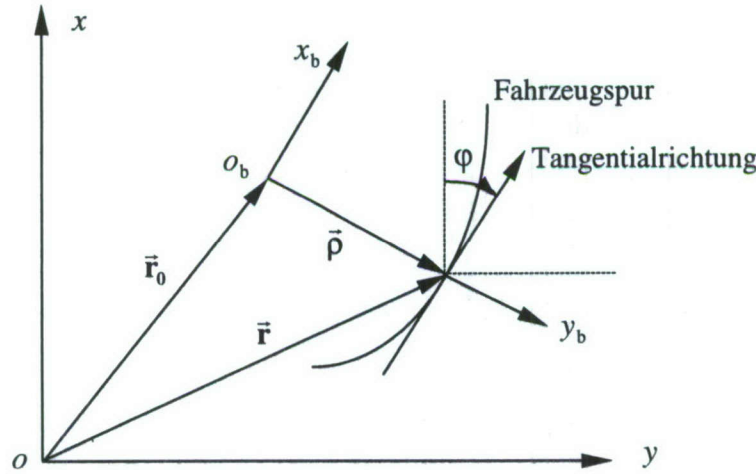


Abb. 4.1 Fahrzeugspur in den 2D-Bezugssystemen

Nach dem Meßentwurf von Abb. 3.1 ergeben sich die Systemgleichungen von einer beliebigen Epoche k bis zur nächsten Epoche $k+1$ zu

$$y(k+1) = y(k) + v_t(k) \sin \varphi(k)(t_{k+1} - t_k) + \frac{1}{2} a_r(k) \cos \varphi(k)(t_{k+1} - t_k)^2, \quad (4.2)$$

$$x(k+1) = x(k) + v_t(k) \cos \varphi(k)(t_{k+1} - t_k) - \frac{1}{2} a_r(k) \sin \varphi(k)(t_{k+1} - t_k)^2, \quad (4.3)$$

$$\varphi(k+1) = \varphi(k) + \frac{a_r(k)}{v_t(k)}(t_{k+1} - t_k), \quad (4.4)$$

$$v_t(k+1) = v_t(k), \quad (4.5)$$

$$a_r(k+1) = a_r(k) \quad (4.6)$$

mit dem Modellfehler

$$\begin{pmatrix} \delta y(k+1) \\ \delta x(k+1) \\ \delta \varphi(k+1) \\ \delta v_t(k+1) \\ \delta a_r(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \sin \varphi(k)(t_{k+1} - t_k)^2 & \frac{1}{6} \cos \varphi(k)(t_{k+1} - t_k)^3 \\ \frac{1}{2} \cos \varphi(k)(t_{k+1} - t_k)^2 & -\frac{1}{6} \sin \varphi(k)(t_{k+1} - t_k)^3 \\ 0 & \frac{(t_{k+1} - t_k)^2}{6v_t(k)} \\ (t_{k+1} - t_k) & 0 \\ 0 & (t_{k+1} - t_k) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_t(k) \\ j_r(k) \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

und die Beobachtungsgleichungen für eine neue Epoche ohne GPS zu

$$b_\varphi(k+1) = \varphi(k+1), \quad (4.8)$$

$$b_{v_t}(k+1) = v_t(k+1), \quad (4.9)$$

sowie die Beobachtungsgleichungen für eine neue Epoche mit GPS zu

$$b_y(k+1) = y(k+1), \quad (4.10)$$

$$b_x(k+1) = x(k+1), \quad (4.11)$$

$$b_\varphi(k+1) = \varphi(k+1), \quad (4.8)$$

$$b_{v_t}(k+1) = v_t(k+1). \quad (4.9)$$

4.3 Das 2D-Modell II: gleichförmig geradlinige Bewegung mit Azimutänderung als Modellfehler

Unter den Bedingungen $\vec{a}(t) = \vec{0}$ und $\vec{\omega}(t) = \vec{0}$ wird ein weiteres Modell so formuliert, daß sein Zustandsvektor vier Komponenten, die Koordinaten y , x , den Azimut φ und die Geschwindigkeit v_t , enthält, und der Modellfehlervektor aus zwei Faktoren, der Tangentialbeschleunigung a_t , und der Zentripetalbeschleunigung a_r , besteht. Mit Hilfe von a_r wird die Änderung des Azimutes als Modellfehler berücksichtigt.

Von einer beliebigen Epoche k bis zur nächsten Epoche $k+1$ heißen die Systemgleichungen

$$y(k+1) = y(k) + v_t(k) \sin \varphi(k)(t_{k+1} - t_k), \quad (4.12)$$

$$x(k+1) = x(k) + v_t(k) \cos \varphi(k)(t_{k+1} - t_k), \quad (4.13)$$

$$\varphi(k_1) = \varphi(k), \quad (4.14)$$

$$v_t(k_1) = v_t(k) \quad (4.15)$$

mit dem Modellfehler

$$\begin{pmatrix} \delta y(k+1) \\ \delta x(k+1) \\ \delta \varphi(k+1) \\ \delta v_t(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \sin \varphi(k)(t_{k+1} - t_k)^2 & \frac{1}{2} \cos \varphi(k)(t_{k+1} - t_k)^2 \\ \frac{1}{2} \cos \varphi(k)(t_{k+1} - t_k)^2 & \frac{1}{2} \sin \varphi(k)(t_{k+1} - t_k)^2 \\ 0 & \frac{(t_{k+1} - t_k)}{v_t(k)} \\ (t_{k+1} - t_k) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_t(k) \\ a_r(k) \end{pmatrix}. \quad (4.16)$$

Man erhält die gleichen Beobachtungsgleichungen wie im Abschnitt 4.2.

4.4 Bewertung der 2D-Modelle

Die 2D-Modelle können anhand ihrer Modellstrukturen sowie ausgehend von Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanalysen, auf der Basis von prädierten Residuen und von Verbesserungen der Beobachtungen bewertet werden.

Die Hauptcharakteristika der zwei Modelle werden in Tabelle 4.1 zusammengestellt. Der Unterschied zwischen den beiden Modellen liegt hauptsächlich darin, daß der Einfluß von Kurven auf das System in den beiden Modellen auf unterschiedliche Weise berücksichtigt worden ist. Im Modell II wird die Fahrspur von dem momentanen Zeitpunkt auf den nächsten schrittweise nach gleichmäßiger geradliniger Bewegung, aber im Modell I nach gleichförmiger Kreisbewegung prädiert. Im Modell I werden kurvige Fahrten durch die Einführung des Zentripetalrucks ins Prozeßrauschen viel strenger als im Modell II modelliert. Es läßt sich leicht beweisen, daß der Zustandsvektor zwischen zwei GPS-Epochen in allen beiden Modellen vollständig beobachtbar ist. Beide Modelle besitzen auch vollständige Störbarkeit mit dem eigenen Prozeßrauschen, sofern die Fahrtrichtung von einer beliebigen Epoche k bis zur nächsten Epoche $k+1$ stets $\varphi(k+1) \neq \varphi(k) \pm 200$ gon erfüllt.

Jedes der Modelle hat seine Vor- und Nachteile. Welches Modell man zur Positionsbestimmung von Landverkehrswegen bevorzugt, ist abhängig von mehreren Faktoren wie Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Krümmungsbild. Aufgrund der durchgeführten Analysen läßt sich zusammenfassend sagen, daß es mehr Vorteile beim Modell I als bei dem anderen Modell gibt. Mit dem Modell I wird die Fahrspur in kurviger Fahrt sehr gut erkannt, und die fünf Komponenten im Zustandsvektor werden optimal geschätzt. Die Redundanzanteile sind gut zwischen Beobachtungen, Prädiktionszustand und Prozeßrauschen aufgeteilt. Das Modell I wird deshalb für weitere Modellrechnungen ausgewählt. Im übrigen ist das etwas einfachere Modell II ebenfalls gut geeignet, wenn sich das Fahrzeug relativ geradlinig bewegt, wie es beim Befahren der meisten Autobahnen der Fall ist.

Tabelle 4.1 Überblick der Modelle

	Modell I	Modell II
Komponenten des Zustandsvektors	y, x, v_t, φ, a_r	y, x, v_t, φ
Faktoren im Prozeßrauschen	a_t, j_r	a_t, a_r
Beobachtungen	y, x, v_t, φ , oder v_t, φ	
beobachtbar	y, x, v_t, φ, a_r	y, x, v_t, φ
störbar	y, x, v_t, φ, a_r	y, x, v_t, φ

5 Räumliche Modelle

5.1 Kardan-Winkel und 3D-Drehmatrix

Im Abschnitt 2.2 wurde die Verdrehung des bewegten System $S_b(o_b-x_b y_b z_b)$ gegenüber dem raumfesten System $S(o-xyz)$ durch die Drehmatrix $D(t)$ ausgedrückt, die eine sehr wichtige Rolle bei INS spielt. Darüber findet man eine ausführliche Beschreibung z.B. in MAGNUS (1971). Um 3D-Modelle darzustellen, soll zuerst kurz auf dieses Thema eingegangen werden.

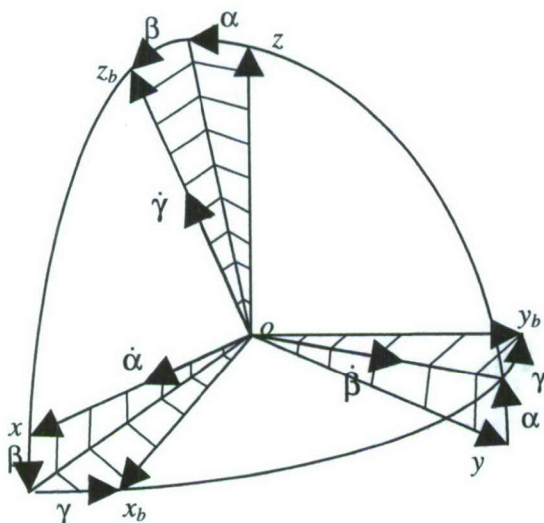


Abb. 5.1 Kardan-Winkel zur Orientierung der Körperachsen

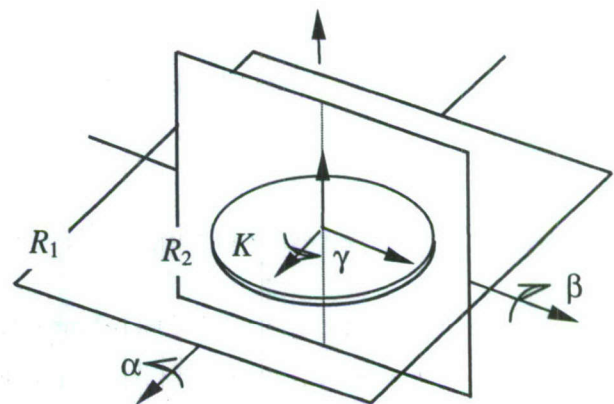


Abb. 5.2 Kardan-Winkel bei einem kardanisch gelagerten Kreisel

Es ist allgemein bekannt, daß die räumliche Drehmatrix $D(t)$ aus 9 miteinander korrelierten Elementen besteht. Diese sind die Richtungscosinus der Winkel zwischen den raumfesten und den bewegten

Achsen. Tatsächlich reichen ja bereits 3 Größen aus, die Lage eines starren Körpers eindeutig zu kennzeichnen, da er um einen Fixpunkt nur 3 Freiheitsgrade besitzt. Als drei voneinander unabhängige Größen werden häufig Euler-Winkel benutzt. Aber falls der Winkel zwischen den Achsen z und z_b (Abb. 2.1) gegen Null geht, werden die anderen zwei Euler-Winkel unbestimmbar. Für manche technischen Kreiselprobleme sind daher die Kardan-Winkel besser geeignet.

Abb. 5.1 stellt die Definition der Kardan-Winkel mit α (Roll–), β (Nick–) und γ (Kurswinkel) nach MAGNUS (1971) dar. Eine mögliche Realisierung eines kardanisch gelagerten Kreisel wird in Abb. 5.2 gezeigt. Die kardanische Aufhängung besteht aus einem äußeren Rahmen R_1 , der sich um die raumfeste x -Achse drehen kann. Der innere Rahmen R_2 ist im äußeren Rahmen R_1 so gelagert, daß er sich um die innere Rahmenachse drehen kann, die senkrecht zur x -Achse steht und in der Normallage mit der raumfesten y -Achse zusammen fällt. Der Kreiselkörper K ist um die im inneren Kardanrahmen feste Rotorachse drehbar, die senkrecht zur inneren Rahmenachse steht und in der Normallage mit der z -Achse zusammenfällt. α zeigt den Drehwinkel um die raumfeste Achse x (äußere Rahmenachse), β den Drehwinkel um die innere Rahmenachse und γ den Drehwinkel um die körperfeste Achse z_b .

Mit Kardan–Winkeln lautet die Drehmatrix von dem raumfesten System $S(O-x, y, z)$ in das körperfeste System $S_b(O_b-x_b, y_b, z_b)$:

$$D(\alpha, \beta, \gamma) = D(\alpha)D(\beta)D(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \cos \beta \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (5.1)$$

Unter Verwendung von Kardan-Winkeln liegt der Vektor der Winkeländerung $\dot{\alpha}$ in der x -Achse, der Vektor der Winkeländerung $\dot{\beta}$ in der inneren Rahmenachse und der Vektor der Winkeländerung $\dot{\gamma}$ in der z_b -Achse (s. Abb. 5.1). Durch Zerlegen dieser Komponenten erhält man nach MAGNUS (1971):

$$\left. \begin{aligned} \omega_{x_b} &= \dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma + \dot{\beta} \sin \gamma \\ \omega_{y_b} &= -\dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma + \dot{\beta} \cos \gamma \\ \omega_{z_b} &= \dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta \end{aligned} \right\} \text{ im körperfesten System } S_b(O_b-x_b, y_b, z_b) \quad (5.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \omega_x &= \dot{\alpha} + \dot{\gamma} \sin \beta \\ \omega_y &= -\dot{\gamma} \cos \beta \sin \alpha + \dot{\beta} \cos \alpha \\ \omega_z &= \dot{\gamma} \cos \beta \cos \alpha + \dot{\beta} \sin \alpha \end{aligned} \right\} \text{ im raumfesten System } S(O-x, y, z) \quad (5.3)$$

5.2 Gleichförmige Kreisbewegung im 3D-Modell

Ein Modell wird hier unter folgenden Annahmen aufgestellt:

- (1) Der sich bewegende Punkt P bleibt immer mit dem bewegten System $S_b(O_b-x_b, y_b, z_b)$ starr verbunden, d.h.:

$$\dot{\vec{p}}_b(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_b(t) \\ \dot{y}_b(t) \\ \dot{z}_b(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \ddot{\vec{p}}_b(t) = \begin{bmatrix} \ddot{x}_b(t) \\ \ddot{y}_b(t) \\ \ddot{z}_b(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \dots \quad (5.4)$$

- (2) Das Fahrzeug macht zwischen zwei benachbarten Zeitpunkten ($\Delta t = t_{k+1} - t_k$ sehr klein) eine gleichförmige Kreisbewegung auf einer Ebene, die durch zwei Lagewinkel α und β im raumfesten Koordinatensystem bestimmt wird. Daraus folgen:

$$\omega_{x_b}(t) = 0,$$

$$\omega_{y_b}(t) = 0.$$

So ergeben sich die Zustandsgleichungen durch

$$\begin{aligned} x(k+1) = & x(k) + v_t(k) \cos \beta(k) \cos \gamma(k) (t_{k+1} - t_k) - \\ & - \frac{1}{2} a_n(k) \cos \beta(k) \sin \gamma(k) (t_{k+1} - t_k)^2, \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} y(k+1) = & y(k) + v_t(k) \cos \alpha(k) \sin \gamma(k) + \sin \alpha(k) \sin \beta(k) \cos \gamma(k) (t_{k+1} - t_k) + \\ & + \frac{1}{2} a_n(k) \{ \cos \alpha(k) \cos \gamma(k) - \sin \alpha(k) \sin \beta(k) \sin \gamma(k) \} (t_{k+1} - t_k)^2, \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} z(k+1) = & z(k) + v_t(k) \{ \sin \alpha(k) \sin \gamma(k) - \cos \alpha(k) \sin \beta(k) \cos \gamma(k) \} (t_{k+1} - t_k) + \\ & + \frac{1}{2} a_n(k) \{ \sin \alpha(k) \cos \gamma(k) + \cos \alpha(k) \sin \beta(k) \sin \gamma(k) \} (t_{k+1} - t_k)^2, \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\gamma(k+1) = \gamma(k) + \frac{a_n(k)}{v_t(k)} (t_{k+1} - t_k), \quad (5.8)$$

$$v_t(k+1) = v_t(k), \quad (5.9)$$

$$a_n(k+1) = a_n(k). \quad (5.10)$$

Das Prozeßrauschen wird durch die Faktoren a_t und j_r modelliert:

$$\delta x(k+1) = \frac{1}{2} a_t(k) \cos \beta(k) \cos \gamma(k) (t_{k+1} - t_k)^2 - \frac{1}{6} j_r(k) \cos \beta(k) \sin \gamma(k) (t_{k+1} - t_k)^3 \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} \delta y(k+1) = & \frac{1}{2} a_t(k) [\cos \alpha(k) \sin \gamma(k) + \sin \alpha(k) \sin \beta(k) \cos \gamma(k)] (t_{k+1} - t_k)^2 + \\ & + \frac{1}{6} j_r(k) [\cos \alpha(k) \cos \gamma(k) - \sin \alpha(k) \sin \beta(k) \sin \gamma(k)] (t_{k+1} - t_k)^3 \end{aligned} \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} \delta z(k+1) = & \frac{1}{2} a_t(k) [\sin \alpha(k) \sin \gamma(k) - \cos \alpha(k) \sin \beta(k) \cos \gamma(k)] (t_{k+1} - t_k)^2 + \\ & + \frac{1}{6} j_r(k) [\sin \alpha(k) \cos \gamma(k) + \cos \alpha(k) \sin \beta(k) \sin \gamma(k)] (t_{k+1} - t_k)^3 \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$\delta \gamma(k+1) = j_r(k) \frac{(t_{k+1} - t_k)^2}{6 v_t(k)} \quad (5.14)$$

$$\delta v_t(k+1) = a_t(k) (t_{k+1} - t_k) \quad (5.15)$$

$$\delta a_r(k+1) = j_r(k) (t_{k+1} - t_k) \quad (5.16)$$

Der Einfluß der Beobachtungsfehler von α und β auf den prädierten Zustandsvektor wird nach dem Varianzenfortpflanzungsgesetz ausgehend von Gl. (5.5) – (5.10) berechnet.

Parallel erhält man die folgenden Beobachtungsgleichungen:

$$\begin{pmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \\ z(k+1) \end{pmatrix}_{GPS} = \begin{pmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \\ z(k+1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_x(k+1) \\ \varepsilon_y(k+1) \\ \varepsilon_z(k+1) \end{pmatrix}_{GPS} \quad (5.17)$$

$$\begin{pmatrix} v_x(k+1) \\ v_y(k+1) \\ v_z(k+1) \end{pmatrix}_{GPS} = \begin{pmatrix} \cos \beta(k+1) \cos \gamma(k+1) \\ \cos \alpha(k+1) \sin \gamma(k+1) + \sin \alpha(k+1) \sin \beta(k+1) \cos \gamma(k+1) \\ \sin \alpha(k+1) \sin \gamma(k+1) - \cos \alpha(k+1) \sin \beta(k+1) \cos \gamma(k+1) \end{pmatrix} v_t(k+1) + \begin{pmatrix} \varepsilon_{v_x}(k+1) \\ \varepsilon_{v_y}(k+1) \\ \varepsilon_{v_z}(k+1) \end{pmatrix}_{GPS} \quad (5.18)$$

$$v_{DLS}(k+1) = v_t(k+1) + \varepsilon_{v_{DLS}}(k+1) \quad (5.19)$$

$$\gamma_{INS}(k+1) = \gamma(k+1) + \varepsilon_{\gamma_{INS}}(k+1) \quad (5.20)$$

$$h_{Barometer}(k+1) = z(k+1) - z_{Referenz}(k+1) + \varepsilon_{h_{Barometer}}(k+1) \quad (5.21)$$

Es läßt sich zusammenfassen:

- (1). Auf der Ebene $o_b-x_b y_b$ wird die Bewegung als gleichförmige Kreisbewegung angenommen. Die Lage dieser Ebene $o_b-x_b y_b$ im raumfesten Koordinatensystem o wird durch die zwei Kardan-Winkel α, β bestimmt. Die Tangentialrichtung auf dieser Ebene wird durch den dritten Kardan-Winkel $\gamma(t)$ beschrieben.
- (2). Der Bewegungszustand auf den Ebenen $o_b-x_b z_b$ und $o_b-y_b z_b$ wird geradlinig gleichförmig angenommen. Die Änderungen der Bewegungsrichtung auf diesen zwei Ebenen werden durch Einsetzen der Beobachtungen von α, β in die Zustandsgleichungen berücksichtigt. Der entsprechende Einfluß ihrer Meßfehler auf den prädierten Zustandsvektor wird nach dem Varianzenfortgepflanzungsgesetz berechnet.
- (3). Der Zustandsvektor besteht aus den folgenden Komponenten:

$x(k), y(k), z(k)$	Koordinaten im raumfesten System
$v_t(k)$	Tangentialgeschwindigkeit
$a_n(k)$	Zentripetal(oder Normal-)beschleunigung
$\gamma(k)$	Richtungswinkel der Tangentialgeschwindigkeit
- (d). Die Fehlerfaktoren im Prozeßbrauchen sind

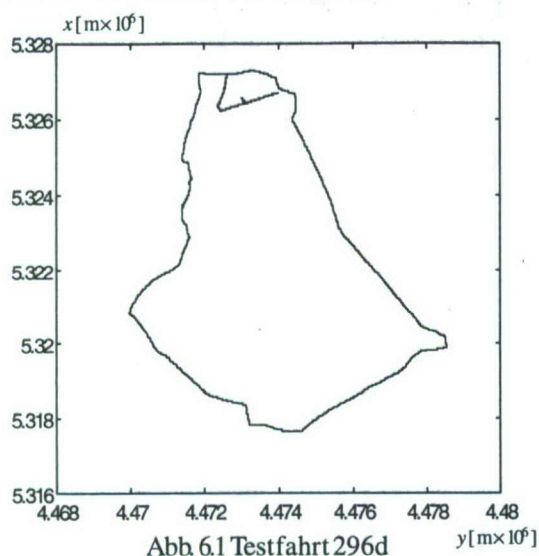
$\alpha(k), \beta(k)$	zwei Kardan-Winkel
$a_t(k)$	Tangentialbeschleunigung
$j_r(k)$	Normalruck

6 Beispiel

In der ersten Version verwendet das System KiSS die folgenden Sensoren: differentielles GPS, LLN83 (INS), DLS (Weggeber), Setra 470 (Barometer) und zwei CCD Kameras. Die Rohdaten aus GPS, INS, Weggeber und Barometer werden vor dem zentralen Kalman Filter vorverarbeitet. Dabei werden die erforderlichen Korrekturen an den Einzelbeobachtungen angebracht, alle Daten werden

auf einen identischen Referenzpunkt transformiert und mit Hilfe von geeigneten Filterungs- oder Glättungsalgorithmen separat bearbeitet. Das GPS-Filter wurde von CHEN und STERNBERG (1998) beschrieben. Die Vorfilterungen der INS-, DLS- und Barometer-Daten wurden von J. WANG in internen Berichten dokumentiert. Alle vorverarbeiteten Daten werden als Beobachtungen im zentralen Kalman Filter eingesetzt, um die Trajektorie des Fahrzeuges zu schätzen.

Im folgenden werden die Ergebnisse einer Testfahrt kurz vorgestellt. Die Testfahrt ist in Abb. 6.1 skizziert, und wichtige Daten sind in Tab. 6.1 zusammengestellt. Das zentrale Kalman Filter wurde für das im Abschnitt 5.2 dargestellte 3D-Modell entwickelt.



Tab. 6.1: Daten der Testfahrt 296d

Meßzeit (s)		3042
Meßepo- chen	GPS	10107 bei 5 Hz
	INS	152101 bei 50 Hz
	DLS	152101 bei 50 Hz
	Barometer	3043 bei 1 Hz.

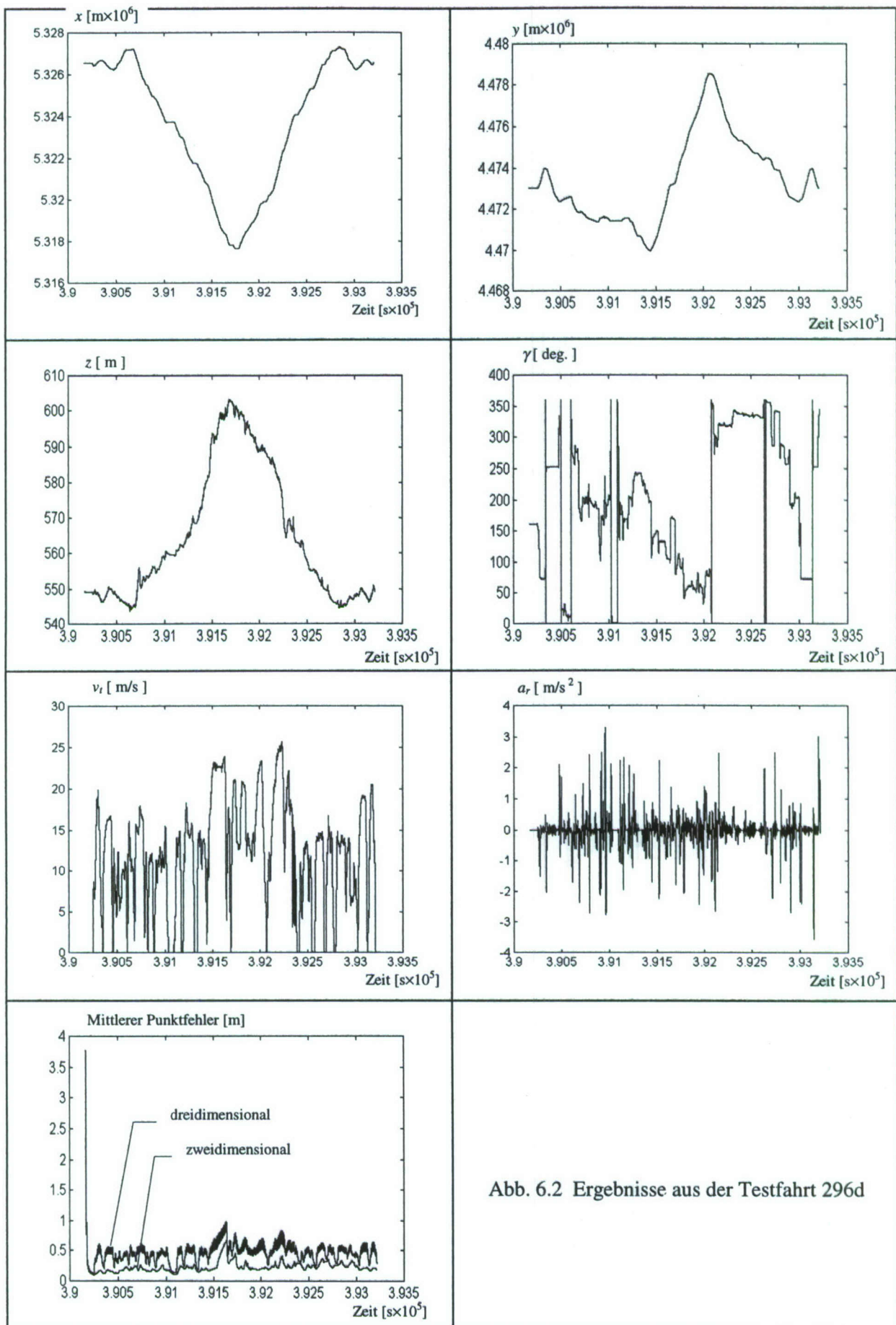
Zur Schätzung der Varianzen wurde die Auswertung iterativ durchgeführt. Nach 4 Iterationen konvergiert die Auswertung mit $\hat{\sigma}_0 = 6.7915$. Aus Raumgründen werden die Ergebnisse nur zum Teil in Abb. 6.2 dargestellt. Der mittlere Punktfehler ist stets besser als 1 [m]. Mit kleinen Lücken in den GPS-Signalen erreicht man als radialen Punktfehler Werte von ca. 0.5 [m].

7 Schluß

Die Entwicklung der kinematischen Vermessung ist in den letzten Jahren sehr rasant gewesen und wird auch in Zukunft unsere Vermessungswelt ständig verändern. Die Verfahren der klassischen Ausgleichsrechnung und Schätztheorie müssen durch neue Verfahren ergänzt werden, da sie hier nur bedingt anwendbar sind. Der Vermessungsingenieur beschreitet ein neues Tätigkeitsfeld.

8 Literaturverzeichnis

- CASPARY, W.; HEISTER, H.; HOCK, CHR.; KLEMM, J.; STERNBERG, H.(1995): *The Kinematic Surveying System KiSS – Design, Mechanization, Application*. Proceedings DSNS 95, The Fourth International Conference on Differential Satellite Navigation Systems, 24–28 April 1995, Bergen, Norwegen, 1995.
- CASPARY, W.; WANG, J.G. (1998): *Redundanzanteile und Varianzkomponenten im Kalman Filter*. (in Druck), ZfV, 1998.
- CHEN, G.P; STERNBERG, H.(1998): *Einsatz des Kalman Filters zur kinematischen Positionierung eines Landfahrzeuges aus GPS-Daten*. Beiträge zur Festschrift “25 Jahre Institut für Geodäsie“ Heft 2, Universität der Bundeswehr München, 1998.
- D’SOUZA, A. FRANK; GARG, VIJAY K. (1984): *Advanced Dynamics – Modelling and Analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1984.
- MAGNUS, KURT (1971): *Kreisel – Theorie und Anwendungen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1971.
- POPP, K.; SCHIEHLEN, W.(1993): *Fahrzeugdynamik – eine Einführung in die Dynamik des Systems Fahrzeug – Fahrweg*. B.G. Teubner, Stuttgart, 1993.
- SCHWARZ, K.P.(1991): *Kinematic Modelling – Progress and Problems*. Symposium No. 107: Kinematic Systems in Geodesy, Surveying, and Remote Sensing, Springer-Verlag, New York Inc. 1991, S. 3–16.
- STERNBERG, H.; CASPARY, W.; HEISTER, H.(1998): *Mobiles Vermessungssystem KiSS*. DVW Seminar „Hybride Vermessungssysteme“, Schriftenreihe des DVW, Band 29, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1998, S. 178 – 192.
- WANG, J. (1997): *Filtermethoden zur fehlertoleranten kinematischen Positionsbestimmung*. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 52, Neubiberg, 1997.
- DVW: *Kinematische Meßmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung*. Schriftenreihe des DVW, Band 22, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1996.
- DVW: *Hybride Vermessungssysteme*. Schriftenreihe des DVW, Band 29, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1998.



Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation der Universität der Bundeswehr München

Bisher erschienene Hefte:

Heft 1/1978

(vergriffen)

A. Schödlbauer (Bearb.): Curriculum für den wissenschaftlichen Studiengang Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München. 53 S.

Heft 2/1978

A. Chrzanowski and E. Dorrer (Eds.): Proceedings "Standards and Specifications for Integrated Surveying and Mapping Systems". Workshop held in Munich, Federal Republic of Germany, 1-2 June, 1977. Assisted by J. McLaughlin. VII, 181 S.

Heft 3/1978

W. Caspary und A. Geiger: Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit elektronischer Neigungsmesser. 62 S.

Heft 4/1979

E. Baumann, W. Caspary, H. Dupraz, W. Niemeier, H. Pelzer, E. Kuntz, G. Schmitt und W. Welsch: Seminar über Deformationsanalysen, gehalten an der Hochschule der Bundeswehr München. 106 S.

Heft 5/1981

K. Torlegård: Accuracy Improvement in Close Range Photogrammetry. 68 S.

Heft 6/1982

W. Caspary und W. Welsch (Hrsg.): Beiträge zur großräumigen Neutrassierung. 271 S.

Heft 7/1982

K. Borre and W. M. Welsch (Eds.): International Federation of Surveyors - FIG. Proceedings "Survey Control Networks". Meeting of Study Group 5B, 7th-9th July, 1982, Aalborg University Centre, Denmark. 431 S.

Heft 8/1982

A. Geiger: Entwicklung und Erprobung eines Präzisionsneigungstisches zur Kalibrierung geodätischer Instrumente. Dissertation. 125 S.

Heft 9/1983

W. Welsch (Hrsg.): Deformationsanalysen '83. Geometrische Analyse und Interpretation von Deformationen Geodätischer Netze. Beiträge zum Geodätischen Seminar 22. April 1983. 339 S.

Heft 10/1984

W. Caspary, A. Schödlbauer und W. Welsch (Hrsg.): 10 Jahre Hochschule der Bundeswehr München. Beiträge aus dem Institut für Geodäsie. 244 S.

Heft 11/1984

(vergriffen)

W. Caspary und H. Heister (Hrsg.): Elektrooptische Präzisionsstreckenmessung. Beiträge zum Geodätischen Seminar 23. September 1983. 270 S.

Heft 12/1984

P. Schwintzer: Analyse geodätisch gemessener Punktlageänderungen mit gemischten Modellen. Dissertation. 159 S.

Heft 13/1984

G. Oberholzer: Landespflege in der Flurbereinigung. 81 S.

Heft 14/1984

G. Neukum: Fernerkundung der Planeten und kartographische Ergebnisse. Mit Beiträgen von G. Neugebauer. Herausgegeben von G. Neugebauer. 102 S.

Heft 15/1984

A. Schödlbauer und W. Welsch (Hrsg.): Satelliten-Doppler-Messungen. Beiträge zum Geodätischen Seminar 24./25. September 1984. 396 S.

Heft 16/1985

(vergriffen)

M. K. Szacherska, W. M. Welsch: Geodetic Education in Europe. 234 S.

Heft 17/1986

B. Eissfeller, G. W. Hein: A Contribution to 3d-Operational Geodesy. Part 4: The Observation Equations of Satellite Geodesy in the Model of Integrated Geodesy. 190 S.

Heft 18/1985

G. Oberholzer: Landespflege in der Flurbereinigung, Teil II. 116 S.

Heft 19/1986

(vergriffen)

H. Landau, B. Eissfeller and G. W. Hein: GPS Research 1985 at the Institute of Astronomical and Physical Geodesy. 210 S.

Heft 20/1985

Heft 20-1

W. Welsch and L. A. Lapine (Eds.): International Federation of Surveyors - FIG. Proceedings "Inertial, Doppler and GPS Measurements for National and Engineering Surveys". Joint Meeting of Study Groups 5B and 5C, July 1-3, 1985. Volume 1. 310 S.

Heft 20-2

W. Welsch and L. A. Lapine (Eds.): International Federation of Surveyors - FIG. Proceedings "Inertial, Doppler and GPS Measurements for National and Engineering Surveys". Joint Meeting of Study Groups 5B and 5C, July 1-3, 1985. Volume 2. S. 311-634

Heft 21/1986

G. Oberholzer: Landespflege in der Flurbereinigung, Teil III. 100 S.

Heft 22/1987

W. Caspary, G. Hein, A. Schödlbauer (Hrsg.): Beiträge zur Inertialgeodäsie. Geodätisches Seminar 25./26. September 1986. 386 S.

Heft 23/1987

E. Dorrer und J. Peipe (Hrsg.): Motografie. Symposium 11./12. März 1986. 285 S.

Heft 24/1987

G. Neugebauer (Hrsg.): Brenta-Monographie - Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Hochgebirgskartographie. Mit Beiträgen von *D. Beineke, H. C. Berann, W. de Concini, G. Hell, D. Herm, H. Immel, U. Kleim, G. Neugebauer und K. Ringle.* 187 S.

Heft 25/1987

A. Perelmutter: Beiträge zur Ausgleichung geodätischer Netze. 75 S.

Heft 26/1987

W. Ellmer: Untersuchung temperaturinduzierter Höhenänderungen eines Großturbinentisches. Dissertation. 109 S.

Heft 27/1988

H. Heister: Zur automatischen Kalibrierung geodätischer Längenmeßinstrumente. Habilitationsschrift. 213 S.

Heft 28/1987

E. H. Paßberger: Systemstudie zur Sicherung ökologischer Vorrangflächen mittels Bodenordnung in Bayern / System study for the protection of ecological priority areas by means of Land rearrangement in Bavaria. Dissertation. 186 S.

Heft 29/1987

H. Glasmacher: Die Gaußsche Ellipsoid-Abbildung mit komplexer Arithmetik und numerischen Näherungsverfahren. Dissertation. 131 S.

Heft 30/1987

Y. Zhang: Beiträge zum Entwurf von optimalen Beobachtungsplänen für tektonische Überwachungsnetze. Dissertation. 151 S.

Heft 31/1988

W. Lechner: Untersuchung einer kreiselorientierten Landfahrzeug-Navigationsanlage im Hinblick auf geodätische Anwendungen und Möglichkeiten der Höhenübertragung. Dissertation. 165 S.

Heft 32/1988

R. König: Zur Fehlertheorie und Ausgleichung inertialer Positionsbestimmungen. Dissertation. 143 S.

Heft 33/1988

H. Borutta: Robuste Schätzverfahren für geodätische Anwendungen. Dissertation. 161 S.

Heft 34/1988

H. Landau, K. Hehl, B. Eissfeller, G. W. Hein and I. W. Reilly: Operational Geodesy Software Packages. 325 S.

Heft 35/1988

G. Oberholzer, E. Paßberger: Landespflege in der Flurbereinigung, Teil IV. 153 S.

Heft 36/1988

H. Landau: Zur Nutzung des Global Positioning Systems in Geodäsie und Geodynamik: Modellbildung, Softwareentwicklung und Analyse. Dissertation. 287 S.

Heft 37/1989

B. Eissfeller: Analyse einer geodätischen raumstabilisierten Inertialplattform und Integration mit GPS. Dissertation. 327 S.

Heft 38/1990

(vergriffen)

Heft 38-1

A. Schödlbauer (Hrsg.): Moderne Verfahren der Landesvermessung. Beiträge zum 22. DVW-Seminar 12.-14. April 1989. Teil I: Global Positioning System. 352 S.

Heft 38-2

A. Schödlbauer (Hrsg.): Moderne Verfahren der Landesvermessung. Beiträge zum 22. DVW-Seminar 12.-14. April 1989. Teil II: Nivellement. Teil III: Vermessungskreisel. S. 353-551

Heft 39/1989

N. Kersting, W. Welsch (Hrsg.): Rezente Krustenbewegungen. Seminar 8./9. Juni 1989. 307 S.

Heft 40/1989

G. Oberholzer: Ländliche Kulturgeschichte und Landentwicklung. 214 S.

Heft 41/1990

G. W. Hein, K. Hehl, B. Eissfeller, M. Ertel, W. Jacoby, D. Czerek: On Gravity Prediction Using Density and Seismic Data. 148 S.

Heft 42/1992

N. Kersting: Zur Analyse rezenter Krustenbewegungen bei Vorliegen seismotektonischer Dislokationen. Dissertation. V, 246 S.

Heft 43/1992

K. Hehl: Bestimmung von Beschleunigungen auf einem bewegten Träger durch GPS und digitale Filterung. Dissertation. XII, 206 S.

Heft 44/1992

W. Oswald: Zur kombinierten Ausgleichung heterogener Beobachtungen in hybriden Netzen. Dissertation. 128 S.

Heft 45/1993

Institut für Geodäsie (Hrsg.): Das Global Positioning System im praktischen Einsatz der Landes- und Ingenieurvermessung. Beiträge zum Geodätischen Seminar 12.-14. 05. 1993. 314 S.

Heft 46/1994

K. Brunner und J. Peipe (Hrsg.): Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer zum 60. Geburtstag. 254 S.

Heft 47/1994

Heft 47-1

K.-H. Thiemann: Die Renaturierung strukturarmer Intensivagrargebiete in der Flurbereinigung aus ökologischer und rechtlicher Sicht. Dissertation. Teil I: Renaturierungsleitbild, Naturschutzverfahren. XXXVI, 384 S.

Heft 47-2

K.-H. Thiemann: Die Renaturierung strukturarmer Intensivagrargebiete in der Flurbereinigung aus ökologischer und rechtlicher Sicht. Dissertation. Teil II: Planungsrechtliche Aspekte. XXXVI, S. 385-572

Heft 48/1994

C. Schwiertz: Experimente zur GPS-gestützten Aerotriangulation unter besonderer Berücksichtigung systematischer Einflüsse. Dissertation. VIII, 192 S.

Heft 49/1995

R. Scheuring: Zur Qualität der Basisdaten von Landinformationssystemen. Dissertation. 126 S.

Heft 50/1997

W. M. Welsch, M. Lang, M. M. Miller (Eds.): Geodetic Activities, Juneau Icefield, Alaska, 1981-1996. 268 S.

Heft 51/1996

H. Blumenhofer: Untersuchungen zu hochpräzisen kinematischen DGPS-Echtzeitverfahren mit besonderer Berücksichtigung atmosphärischer Fehlereinflüsse. Dissertation. X, 168 S.

Heft 52/1997

J. G. Wang: Filtermethoden zur fehlertoleranten kinematischen Positionsbestimmung. Dissertation. XV, 138 S.

Heft 53/1996

G. Chen: Robuste Verfahren zur Analyse linearer stochastischer Prozesse im Zeitbereich. Dissertation. III, 128 S.

Heft 54/1997

J. Dold: Ein hybrides photogrammetrisches Industriemeßsystem höchster Genauigkeit und seine Überprüfung. Dissertation. 140 S.

Heft 55/1997

B. Eissfeller: Ein dynamisches Fehlermodell für GPS Autokorrelationsempfänger. Habilitationsschrift. XII, 182 S.

Heft 56/1997

T. Sutor: Robuste Verfahren zur Analyse linearer stochastischer Prozesse im Spektralbereich. Dissertation. 123 S.

Heft 57/1997

G. Oberholzer: Ländliche Kulturgeschichte und Landentwicklung, Teil II. 186 S.

Heft 58/1997

D. Zhong: Datumsprobleme und stochastische Aspekte beim GPS-Nivellement für lokale Ingenieurnetze. Dissertation. 160 S.

Heft 59/1997

T. Jiang: Digitale Bildzuordnung mittels Wavelet-Transformation. Dissertation. II, 136 S.

Heft 60/2000

*W. Caspary, H. Heister, A. Schödlbauer,
W. Welsch (Hrsg.): 25 Jahre Institut für Geodäsie*

Heft 60-1: Wissenschaftliche Arbeiten und Berichte,
331 S.

Heft 60-2: Forschungsarbeiten und Veröffentlichun-
gen, 113 S.

Heft 60-3: Aus dem Leben des Instituts, 149 S.